



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782

CN 11-2021/P

我国大陆地区地震动衰减关系研究进展

刘平 徐政伟 罗奇峰

Advances in ground motion attenuation relationship of Chinese mainland

Liu Ping, Xu Zhengwei, Luo Qifeng

引用本文:

刘平, 徐政伟, 罗奇峰. 2022. 我国大陆地区地震动衰减关系研究进展. *地震学报*[J], 44(5): 797–809. DOI: 10.11939/jass.20220117

Liu P, Xu Z W, Luo Q F. 2022. Advances in ground motion attenuation relationship of Chinese mainland. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(5): 797–809. DOI: [10.11939/jass.20220117](https://doi.org/10.11939/jass.20220117)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220117>

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>

基于小波函数的地震动反应谱与峰值位移拟合方法

A matching method of ground-motion response spectrum and the peak displacement based on the wavelet function

地震学报. 2021, 43(3): 376–386 <https://doi.org/10.11939/jass.20200138>

基于我国强震动数据的地震动持时预测方程

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

地震学报. 2018, 40(6): 809–819 <https://doi.org/10.11939/jass.20180008>

基于强震动记录的地震生命损失快速评估方法

Rapid evaluation method of life loss in earthquakes based on strong ground motion records

地震学报. 2017, 39(1): 143–154 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.01.012>

中国大陆地区宽频带地震台网台基噪声特征

Seismic noise characteristics of broad-band seismic networks in Chinese mainland

地震学报. 2019, 41(5): 569–584 <https://doi.org/10.11939/jass.20190031>

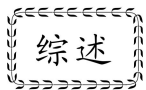
基于强震动数据的龙门山地区地震动预测模型参数反演

Parameter estimation of ground-motion prediction model in Longmenshan region based on strong motion data

地震学报. 2018, 40(3): 374–386 <https://doi.org/10.11939/jass.20170215>

刘平, 徐政伟, 罗奇峰. 2022. 我国大陆地区地震动衰减关系研究进展. 地震学报, 44(5): 797-809. doi: 10.11939/jass.20220117.

Liu P, Xu Z W, Luo Q F. 2022. Advances in ground motion attenuation relationship of Chinese mainland. *Acta Seismologica Sinica*, 44(5): 797-809. doi: 10.11939/jass.20220117.



我国大陆地区地震动衰减关系研究进展*

刘 平¹⁾ 徐政伟¹⁾ 罗奇峰^{2),†}

1) 中国西安 710054 西安科技大学建筑与土木工程学院

2) 中国上海 200092 同济大学上海防灾救灾研究所

摘要 地震动衰减关系是场地地震动估计的主要方法之一. 本文首先对地震动衰减关系式的发展作了简要的阐述; 其次, 分析了胡聿贤先生提出的借用法的重要性, 回顾了我国衰减关系的发展历程, 并重点介绍了水平向地震动、竖向地震动及其它地震动参数衰减关系的研究进展; 最后, 讨论了衰减关系研究中存在的问题, 并提出了发展强震动数据库和缺乏强震记录地区衰减关系的建议.

关键词 地震动 衰减关系 借用法 数据库 缺乏强震记录地区

doi: 10.11939/jass.20220117

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

Advances in ground motion attenuation relationship of Chinese mainland

Liu Ping¹⁾ Xu Zhengwei¹⁾ Luo Qifeng^{2),†}

1) School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

2) Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Ground motion attenuation relationship is one of the primary methods for site ground motion estimation. In this paper, firstly, the development of the ground motion attenuation relationship equations is briefly described. Then it analyzes the importance of the conversion method proposed by Mr. Hu Yuxian, reviews the development process of the attenuation relationship in the Chinese mainland, and focuses on research progress of horizontal ground motion, vertical ground motion, and other ground motion parameters. Finally, the limitations existing in the study of attenuation relationships are discussed, and suggestions for developing the strong ground motion database and the attenuation relationship in regions with poor ground motion records are put forward.

* 基金项目 国家自然科学基金(51808444, 51078273)资助.

收稿日期 2022-07-02 收到初稿, 2022-08-04 决定采用修改稿.

作者简介 刘平, 博士, 副教授, 主要从事地震特性、地震诱发次生灾害的评估等研究, e-mail: liuping1005@xust.edu.cn; † 罗奇峰, 博士, 教授主要从事地震工程、城市综合防灾减灾等研究, e-mail: luo@tongji.edu.cn



Key words: ground motion; attenuation relationship; conversion method; database; regions with poor ground motion records

引言

地震动衰减关系是地震动与其影响因素(震源、距离、场地条件等)的经验关系式. 作为地震动估计最主要的方法, 地震动衰减关系对抗震设防具有重要意义. 地震动衰减关系是以地震动记录数据为研究基础, 因此在记录丰富的美国、日本等国家此项研究较为系统.

日本学者 Kanai (1961) 最早用与震级和距离有关的数学式来表示地震动衰减关系, 即

$$\ln A = c_1 + c_2 M + c_3 \ln R, \quad (1)$$

式中, A 为峰值加速度(peak ground acceleration, 缩写为 PGA), M 为震级, R 为震中距, c_1 , c_2 和 c_3 为回归参数. 随后, Esteva 和 Rosenblueth (1964) 以及 Housner (1965) 分别使用式(1)对美国的强震记录进行了拟合; Esteva (1970) 考虑地震动在近场的饱和现象, 在距离参数后引入一个距离饱和因子 R_0 ; 在此基础上, Duke (1972) 在衰减关系中考虑表示能量吸收引起的地震能量衰减, 衰减关系包括震级项、近场峰值饱和项、几何扩散引起的能量衰减以及能量吸收引起的能量衰减, 具体表示为

$$\ln A = c_1 + c_2 M + c_3 \ln(R + R_0) + c_4 R, \quad (2)$$

式中: R_0 为距离饱和因子, c_1 , c_2 , c_3 和 c_4 为回归参数. 该模型在之后的研究中得到了广泛应用, 为地震动衰减关系式的发展奠定了基础; der Kiureghian 和 Ang (1977) 考虑大震引发断层破裂对地震动的影响, 提出断层破裂模型的地震危险性分析方法(用断层距表示距离参数), 从此, 多数衰减关系式采用了断层距作为距离参数; 而后, Joyner 和 Boore (1981) 及 Campbell (1981) 考虑到地震记录中震级与距离分布不均, 分别回归出美国西部的 PGA 衰减关系; Boore 等 (1997) 利用美国地质调查局在美国西部的 19 组地震记录的 PGA 和加速度反应谱 (acceleration response spectrum, 缩写为 SA) 进行回归, 引入场地剪切波速对场地作详细分类, 同时也对走滑断层、逆断层和断层机制不明的发震断层采用不同参数予以区分, 模型考虑了断层机制、场地类型对地震动的影响. 除此之外还有很多学者也作了相似研究 (Idriss, 1991; Abrahamson, Shedlock, 1997; Campbell, 1997; Sadigh *et al.*, 1997; Gregor, Bolt, 1997).

进入二十一世纪, 全球强震记录数据库的扩充为衰减关系研究带来新的机遇. 2003 年下一代地震动衰减模型 (Next Generation Attenuation, 缩写为 NGA) 项目开启. 该项目分为 NGA-west 和 NGA-east 两部分. NGA-west 主要为美国西部等构造活跃区的地震动衰减关系研究, 包括 NGA-west1 和 NGA-west2 两阶段. NGA-west1 在 2003—2008 年期间, 五个团队在统一的数据库下研发各自的衰减模型, 考虑的因素包括断层类型、上(下)盘效应、盆地放大效应和场地放大效应等 (Power *et al.*, 2008); NGA-west2 通过增加近场方向性效应、地形效应等因素进一步完善 NGA-West1 的模型 (Bozorgnia *et al.*, 2014). NGA-east 则主要是针对构造活动比较稳定的北美中部和东部地区的地震动衰减关系的研究, 并结合少量强震动记录通过嫁接 NGA-west 模型得到适合的衰减模型 (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2015). 另外, NGA 项目还衍生出(基于俯冲带地震记录)地震动衰减模型 NGA-sub (Bozorgnia *et al.*, 2022). NGA 项目使衰减关系的研究取得了较大的进步.

由于构造特征等条件的差异导致地震动衰减关系具有显著的区域特征, 很多国家(地区)都相继开发基于本区域地震动数据的衰减关系. 我国是地震最为活跃的国家之一, 由于

台站建设滞后,衰减关系的研究一度落后于日美等国家,但通过近几十年的不断探索研究也取得了宝贵的研究成果.本文拟对我国地震动衰减关系的研究作一个简单的回顾,最后对近些年研究的新进展予以介绍,并对研究中的问题提出一些见解,为今后相关的研究提供参考.

1 我国地震动衰减关系研究的发展

我国早期对衰减关系的研究主要集中在地震烈度、烈度与地震动特别是PGA的转换方法上.由于强震观测网络发展缓慢,强震记录不足以支持发展可靠的衰减关系,如何针对我国现状建立地震动衰减关系是地震工程研究的主要问题.由于我国的历史地震资料较为丰富可得到地震的烈度信息,从而拟合烈度的衰减关系,再借助同时具有地震动和烈度衰减关系的美国西部等地区的资料,通过转换的方法得到适用于我国的地震动衰减关系(万卫, 2013).胡聿贤等提出利用借用法建立我国地震动参数衰减关系,为该研究奠定了基础(胡聿贤, 张敏政, 1984; 霍俊荣等, 1992; 胡聿贤等, 1996).以此,我国各个地区都相继开展了本地区的衰减关系研究(汪素云等, 2000; 石树中, 沈建文, 2003; 雷建成等, 2007).该方法适用于我国强震记录匮乏的特殊历史时期,推动了我国地震动衰减关系研究和地震危险性分析工作的发展.然而随着该方法的深入研究,其不足也随之显现出来,也相应提出了一些改进(廖振鹏, 1989; 廖振鹏, 郑天愉, 1997; 李小军等, 2005).

近些年,我国学者对地震动衰减关系的理论、半理论等方法也进行了一些研究.刘充和陶夏新(2004)使用简化的点源衰减关系,估计出适合我国华北、西南地区的PGA衰减关系.刘陶钧(2009)使用美国西部的小震的记录,反演出该地区的震源和衰减参数,拟合出美国西部的简化PGA衰减关系,并通过与NGA-west1模型对比表明了该方法的适用性.另外,还有很多学者也进行了大量相关研究(田启文等, 1986; 王亚勇, 李虹, 1986; 霍俊荣, 1989; 郭玉学, 王国新, 1990; 周锡元等, 1990; 俞言祥, 2002),此处不予赘述.

2008年汶川地震中,我国新建成的数字强震观测台网获取了大量的高质量强震记录.诸多学者针对汶川地震的地震动特性及衰减关系展开了一系列的研究.Wang和Xie(2009, 2010)使用汶川地震的近、中场地震动记录拟合衰减关系并与NGA-west1中的AS08模型相比较,结果表明:汶川地震的地震动在长周期($T > 1$ s)小于预测值,而在短周期($T < 0.5$ s)大于预测值.刘浪(2010)分别研究了汶川地震上(下)盘及破裂方向和反方向四个区域的PGA和SA与持时的衰减关系,研究大震上(下)盘效应和破裂方向性对地震动的影响.杨帆和罗奇峰(2010a, b)以及刘平和罗奇峰(2013)结合汶川地震的地震资料,同样考虑发震断层的上(下)盘效应及断层的破裂方向性对地震动的影响,利用烈度等震线控制PGA等值线,用插值的方法得到了台站在不同坐标系下的投影,分别提出四区域、六区域和映射圆的汶川 $M_s 8.0$ 地震衰减关系模型.喻焜和李小军(2012)也给出了基于NGA模型的汶川地震地震动衰减关系,其结果与NGA-west1的CB08模型的比较表明,CB08模型的预测值会低估汶川地震的中、近场地震动参数.刘平和罗奇峰(2015, 2017)基于近场地震动的饱和理论(即大震近场地震动主要与距离场地较近的那部分断层有关)提出了用多个“点圆”模型来模拟大震对地震动影响的多圆组合地震动衰减模型,并通过汶川地震及NGA数据库的强震记录对模型进行回归,其结果分析表明该模型相对于点圆模型和断层破裂模型具有一定优势.针对汶川地震强震动及其衰减关系的研究仍在继续进行.特别是在汶川地震后,我国地震动衰减关系研究进入了一个主要以国内强震动记录为基础的新阶段.

2 我国地震动衰减关系研究的新进展

2.1 水平向区域地震动参数的衰减关系

随着数十年的积累，我国强震动数据库已经收集到了万余条数字强震记录，特别是在地震频发和台站布置密集的川滇地区(图 1)。这些强震记录为研究区域性的衰减关系提供了数据基础。

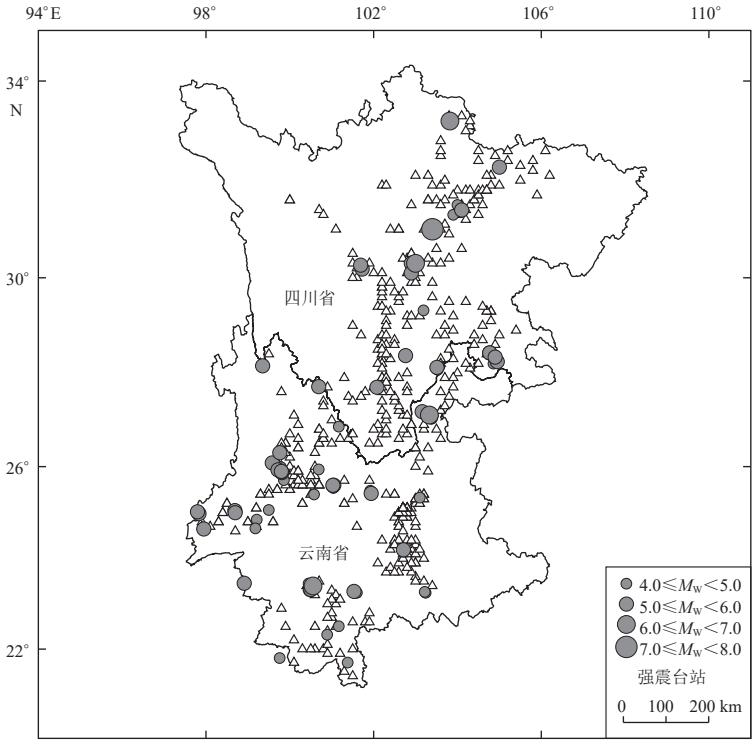


图 1 2008—2020 年川滇地区 $M_w \geq 4.0$ 地震震中和台站分布

Fig. 1 Locations of $M_w \geq 4.0$ earthquakes and distribution of strong-motion stations in Sichuan and Yunnan regions during 2008–2020

王玉石(2010)利用汶川主震和余震及其它几次地震资料，初步提出了川滇地区的强地震动衰减关系。喻焜等(2014)利用 2007 年以来川滇地区 24 次中小型破坏性地震($M_S 4.7-6.7$)的基岩场地和土层场地的强震动记录，分别统计得到了川滇地区水平向基岩场地和土层场地的 PGA 和 SA 的衰减关系，并验证该衰减关系对于用中小地震进行地震动估计的可靠性。樊倬等(2020)利用南北地震带南段的 217 次中小地震的地震动记录回归 PGA 和峰值速度 (peak ground velocity, 缩写为 PGV) 随震中距变化的衰减关系。Li 等(2020)使用川滇地区几次强震的 250 组记录及全球构造活跃区浅源地震的 276 组记录补充川滇地区 $M_w 7.0-7.9$ 地震的空白，最终回归出川滇地区 PGA 和 SA 的衰减关系，其结果表明该模型在该地区有一定的适用性。张斌等(2021a)收集了我国西南地区 79 次 $M_S 4.0-8.0$ 主震(断层距小于 200 km)的自由场地的 1 600 个加速度记录，统计回归得到西南地区包含震级饱和效应、震级相关几何衰减、线性和非线性场地响应、非弹性衰减的水平向 PGV、峰值位移 (peak ground displacement, 缩写为 PGD) 的衰减关系。Zhang 等(2022)同样利用西南地区的 1 324 组水平均值地震动拟合

出一组新的水平向 PGA, PGV 和 5% 阻尼比 SA (0.033—8.0 s) 的地震动预测模型。

另外,对于强震近场水平向地震动方向性特征的研究也取得一定进展。谢俊举等(2018)对芦山 $M_S 7.0$ 地震的研究结果表明断层距 35 km 内 SA 存在明显的卓越方向,最大加速度反应可达最小值的 4 倍以上,随着断层距的增加方向性差异减小。Xie (2019)通过集集 $M_W 7.6$ 地震研究发现震源距处于 50—100 km 内时地震动参数的方向性与破裂方向有关。张斌等(2021b)关于漾濞 $M_S 6.4$ 地震的研究结果表明近场 30 km 内 PGA 表现出南北向高于东西向的方向性差异,PGA 最大值相差 1.86 倍。上述研究对衰减关系中方向性的定性表征均具有一定的参考价值。

2.2 竖向地震动参数的衰减关系

大震震害研究表明:竖向地震作用对建(构)筑物,特别是一些功能性建筑构造如大型储油罐、大跨桥梁、高速公路、大坝等的影响不可忽视(陈念英, 1985; Papazoglou, Elnashai, 1996; Kunnath *et al.*, 2008)。在抗震设计中竖向地震动多数情况下都用水平向地震动乘以一个固定系数,即竖向与水平向比(vertical-to-horizontal ratios, 缩写为 V/H)来估计, V/H 以 Newmark 和 Hall (1982)提出的 2/3 为参考值。Bozorgnia 和 Campbell (2004)研究表明竖向地震动与周期和距离有极强的相关性,且 V/H 值一般在高频大于低频,在近场大于远场,在土层场地大于基岩场地。NGA 项目也进行了竖向地震动和 V/H 的地震动模型的研究(Stewart *et al.*, 2016; Bozorgnia, Campbell, 2016)。

我国对于竖向地震动的研究相对国外有一定滞后。周正华等(2002)将国内外 10 次地震的记录按距离和场地类型分成 9 组,统计不同分组的 V/H 均值(主要针对 PGA 和 SA),其结果表明该比值随着距离的增加而减小,且场地越软,该值越大。周正华等(2003)又统计了集集地震的 V/H (主要针对 SA),其结果显示:对于短周期而言,场地越软,比值越大,而对于长周期而言,场地越软,比值越小。耿淑伟和陶夏新(2004)收集强震观测数据基于我国抗震规范的场地分类标准研究表明:基岩场地的 V/H 与周期相关,但没有土层场地明显;土层场地短周期处 V/H 值有大于 1 的峰值,在 0.2—1 s 之间有一低谷,当周期达到 2 s 时, V/H 值为小于 0.6 的常数;此处还给出了 V/H 值的修正参考式。随后很多国内学者(周锡元等, 2006; 周正华等, 2007; 徐龙军, 谢礼立, 2007; 贾俊峰, 欧进萍, 2009, 2010; 李恒等, 2010; 齐娟等, 2014; 肖亮, 俞言祥, 2014)都用国内外的数据库(以 NGA-west1 为主)研究了竖向地震动或 V/H 的特性,其研究均表明竖向地震动和 V/H 与距离、场地类型、周期等因素均存在一定相关性。

汶川地震、芦山地震等强震发生后,结合国内强震动记录的竖向地震动研究一时成为热点。谢俊举等(2010)选取汶川地震中断层距小于 120 km 的 40 个台站的记录分析竖向地震动的特征表明:竖向峰值加速度有明显的上盘效应和场地效应,以及 V/H 在不同周期和震中距显现出不同的特性。韩建平和周伟(2012)对汶川地震 94 组记录的初步研究表明 V/H 随震中距的增加而减小,并且 V/H 对场地条件和周期的变化较为敏感。Xie 等(2014)分析组芦山地震的记录也表明 V/H 与距离和场地类型有极强的相关性。刘平等(2020)系统研究汶川地震的竖向地震动特征,拟合出汶川地震的竖向地震动衰减关系和 V/H 关系模型,并提出了一个简单的竖向设计反应谱曲线。Xing 和 Zhao (2021)利用五个近期的衰减模型(三个基于 NGA-west2 数据库,一个基于欧洲和中东数据库,一个基于日本浅地壳和上地幔地震数据库)对我国西部和西南地区 449 次地震的 2 403 组地震记录的竖向地震动进行评价,分析结果表明

Zhao 等(2017)的竖向地震动模型更适用于我国西部和西南地区, 这些工作对我国抗震工作中竖向地震动的估计及规范中关于竖向地震动规定的修订具有重要的参考价值。

2.3 其它地震动参数的衰减关系

阿里亚斯强度是地震动加速度的平方对时间进行积分所得到的地震动参数(Arias, 1970)。由于它包含了地震动振幅、频谱以及持时特性, 一定程度上能反映地震动的能量等多种属性, 并且因其在沙土液化评估、地震灾害损失估计、特别是地震诱发滑坡预测等方面的优势引起了地震工程及地震学方面学者的关注。Liu 等(2015)研究了 1999 年集集地震阿里亚斯强度的衰减特征及其与 PGA 的相关性。李伟等(2017)利用 NGA-west1 数据库拟合了阿

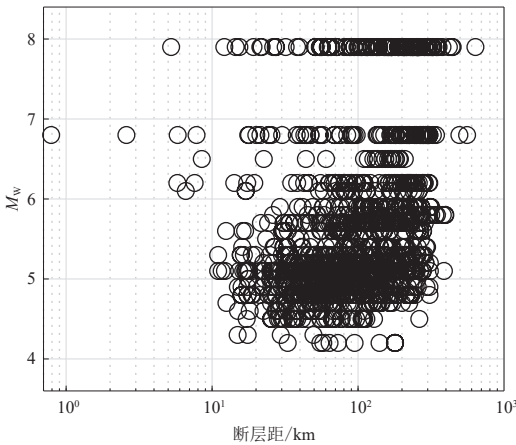


图 2 川滇地区 2008—2020 年 $M_w \geq 4.0$ 强震记录的矩震级随断层距分布(Liu, Ren, 2022)

Fig. 2 Moment magnitude versus fault distance of strong ground motion records for $M_w \geq 4.0$ in Sichuan and Yunnan regions during 2008–2020 (Liu, Ren, 2022)

里亚斯强度的衰减关系, 通过对汶川和芦山地震数据的验证表明该模型对我国的大震有较好的适用性。李雪婧等(2021)研究了芦山地震阿里亚斯强度的空间分布特征, 其结果表明相比 PGA, 阿里亚斯强度与地震诱发滑坡的纽马克(Newmark)位移有更好的相关性。Liu 和 Ren (2022)利用川滇地区近些年的强震记录(图 2)拟合了川滇地区的阿里亚斯强度衰减关系, 与其它模型相比该模型更适用于川滇地区, 此工作对我国西南地区的地震诱发滑坡的危险性区划有重要的参考价值。另外针对累计绝对速度(李雪婧, 2017; Ji et al, 2021)、地震动持时(白玉柱, 徐锡伟, 2017; 徐培彬, 温瑞智, 2018)等地震动参数的衰减特征研究也予以开展。

3 研究中存在问题

我国地震动衰减关系的研究虽然已经取得了长足的发展, 但还存在以下几点问题:

1) NGA 数据库按标准的数据格式建立了一个 flatfile 文件(Chiou et al, 2008)。对于每个记录, 用 131 个参数分别描述地震震源、传播路径、局部场地条件和地震动特征, 信息量极大。这为衰减关系中考虑场地分类、断层类型、上(下)盘效应、场地效应、盆地效应等提供了完善的数据支持。目前我国的强震数据库中, 相关信息比较缺乏, 如描述场地条件的 v_{s30} , 描述盆地效应的覆盖层厚度 $z_{1.5}$ 和 $z_{2.5}$ 等, 这也导致了我国衰减关系研究所考虑因素较为简单, 很多参数只能通过粗略的估计或者假设, 降低了模型预测的精度, 增加了结果的不确定性。这些客观因素在很大程度上限制了衰减关系的研究进展。

2) 目前关于衰减关系的研究多集中在对单次地震的研究或者利用其它衰减关系来验证地震动的记录分析模型的适用性, 并且研究的对象还多集中于水平地震动。区域地震动衰减关系是地震危险性区划工作的基础, 目前的区域模型仅包括 Li 等(2020)提出的川滇地区的水平向 PGA 和 SA 的衰减关系, 张斌等(2021b)提出的西南地区水平向 PGV 和 PGD 的衰减关

系, Zhang 等(2022)提出的西南地区水平向 PGA, PGV 和 SA 的衰减关系, Liu 和 Ren (2022)提出的川滇地区阿里亚斯强度的衰减关系. 本地大震记录缺乏(仅汶川地震)也导致了这些衰减关系对于大震预测结果存在不确定性(无充足数据验证).

3) 近年来, 我国西北地区(如新疆)发生了大量地震, 积累了一定数量的强震记录, 另外还有很多缺乏地震动记录的地区仍在沿用通过借用法开发的衰减模型. 这些区域如何建立新的地震动衰减模型也是需要解决的问题.

4) 地震动衰减关系的研究方法大多还是简单的回归拟合和模型比较. 对于这些方法所获得结果的不确定性分析还不够深入, 很少有研究考虑除事件间和事件内的不确定性以外的因素对回归结果的影响, 包括场地间不确定性及空间分布的不确定性. 少数学者尝试引入地震学、地震动模拟、人工智能的理论(贾晓琳, 2016; 陶正如, 陶夏新, 2017; Ji *et al.*, 2021), 但衰减关系与其它相关学科的交叉性研究仍然较少.

4 结论和展望

地震动衰减关系是抗震设防中地震动估计的主要手段. 由于强震动数据缺乏, 以胡聿贤先生等提出的借用法为基础的转换方法建立的地震动衰减关系在我国很长一个时期的抗震设防工作中扮演着重要的角色. 随着 2008 年中国数字强震台网的建成, 近十余年来, 我国已经获取了大量高质量的数字强震记录, 为地震动衰减关系的深入研究和开展带来前所未有的契机. 一方面很多学者针对汶川地震的地震动展开了一系列研究, 另一方面针对区域性的地震动衰减关系的研究也有了新的进展. 研究对象从单纯的水平向 PGA 逐渐扩展至 SA, PGV 和 PGD 等地震动参数, 近些年又有学者针对竖向地震动、阿里亚斯强度、累计绝对加速度、地震动持时等参数开展研究. 衰减关系考虑的因素从简单的震级和距离到综合考虑断层类型、断层规模、断层破裂方向性、地震动近场方向性、上(下)盘效应、场地线性及非线性放大效应等因素对地震动的影响. 也有学者尝试结合地震学、人工智能等理论对地震动衰减关系进行研究. 地震动衰减关系取得长足进步的同时, 目前还存在数据库对地震动记录相关参数的表征不够完善、地震动衰减关系研究的区域比较局限、研究方法和对象仍然比较简单等问题.

未来的研究中, 应关注国外尤其是以 NGA 项目为代表的最新研究进展, 还应注意以下两个问题:

1) NGA 项目有着强大的强震动数据库的支持. 该数据库描述单组记录的参数高达 131 条, 在包括我国在内的大多数国家建立类似的数据库还不现实. 因此, 目前应该首先解决关键参数的缺失, 如场地条件 v_{s30} , 覆盖层厚度($z_{1.5}$, $z_{2.5}$)等, 然后再不断完善其它相关参数. 这应是我国现阶段强震动数据库建立的一个重要的思路. 近两年来, 我国学者如 Xie 等(2022)已经在场地条件等方面的数据库取得了一些研究成果, 这些数据已被应用到最新的衰减关系研究中(Zhang *et al.*, 2022). 随着数据库的不断更新, 模型的性能也将不断提高.

2) 除西南地区以外, 我国大部分区域属于缺乏强震记录的地区, 这是我国建立现代化地震动衰减关系模型的难点. 目前, 对于缺乏强震记录的地区, 基于模拟地震动建立的衰减关系被证实具有极高的精度和可靠性, 已被广泛地应用于地震工程研究中(Abrahamson *et al.*, 2019). 此类的研究我国目前还涉及较少(贾晓琳, 2016; Tang *et al.*, 2022), 该方法也将是未来我国缺乏强震记录地区建立地震动衰减关系的一种主要方法.

经过多年的发展,地震动衰减关系已成为我国地震工程领域主要的研究方向.相信随着国内学者的持续重视,地震动衰减关系的研究也必将迎来新的进展.

本文图 1 使用 GMT (Wessel *et al*, 2019) 绘制,中国地震局工程力学研究所提供了图中震中和台站的位置坐标,作者在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 白玉柱, 徐锡伟. 2017. 由强震动数据分析芦山地震地面运动持时及周期特征 [J]. *地震地质*, **39**(1): 92–103.
- Bai Y Z, Xu X W. 2017. Analysis on the characteristics of duration and period of ground motion of the Lushan earthquake based on the station records[J]. *Seismology and Geology*, **39**(1): 92–103 (in Chinese).
- 陈念英. 1985. 竖向地震力对建筑物破坏的工程实例 [J]. *工程力学*, **2**(4): 130–133.
- Chen N Y. 1985. Engineering example of vertical seismic force damage to buildings[J]. *Engineering Mechanics*, **2**(4): 130–133 (in Chinese).
- 樊倬, 唐启家, 徐锐, 刘江平. 2020. 南北地震带南段水平向地震动衰减特征 [J]. *地球物理学报*, **63**(1): 223–235.
- Fan Z, Tang Q J, Xu R, Liu J P. 2020. Attenuation of horizontal earthquake ground motion in the southern segment of the North-South Seismic Belt, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **63**(1): 223–235 (in Chinese).
- 耿淑伟, 陶夏新. 2004. 地震动加速度反应谱竖向分量与水平分量的比值 [J]. *地震工程与工程振动*, **24**(5): 33–38.
- Geng S W, Tao X X. 2004. The ratios of vertical to horizontal acceleration response spectra[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **24**(5): 33–38 (in Chinese).
- 郭玉学, 王国新. 1990. 华北地区基岩场地水平加速度的衰减规律 [J]. *地震工程与工程振动*, **10**(1): 41–50.
- Guo Y X, Wang G X. 1990. Attenuation of horizontal peak value of acceleration on rock site in North China[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **10**(1): 41–50 (in Chinese).
- 韩建平, 周伟. 2012. 汶川地震竖向地震动特征初步分析 [J]. *工程力学*, **29**(12): 211–219.
- Han J P, Zhou W. 2012. Preliminary investigation on characteristics of vertical ground motion during Wenchuan earthquake[J]. *Engineering Mechanics*, **29**(12): 211–219 (in Chinese).
- 胡聿贤, 张敏政. 1984. 缺乏强震观测资料地区地震动参数的估算方法 [J]. *地震工程与工程振动*, **4**(1): 1–11.
- Hu Y X, Zhang M Z. 1984. A method of predicting ground motion parameters for regions with poor ground motion data[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **4**(1): 1–11 (in Chinese).
- 胡聿贤, 周克森, 阎秀杰. 1996. 缺乏地震动加速度记录地区地震动估计的映射法 [J]. *地震工程与工程振动*, **16**(3): 1–10.
- Hu Y X, Zhou K S, Yan X J. 1996. A method for evaluation of ground motion in regions with few acceleration observation data[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **16**(3): 1–10 (in Chinese).
- 霍俊荣. 1989. 近场强地面运动衰减规律的研究 [D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所: 29–39.
- Huo J R. 1989. *Study on the Attenuation Law of Near Field Ground Motion*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, State Seismological Bureau: 29–39 (in Chinese).
- 霍俊荣, 胡聿贤, 冯启民. 1992. 关于通过烈度资料估计地震动的研究 [J]. *地震工程与工程振动*, **12**(3): 1–15.
- Huo J R, Hu Y X, Feng Q M. 1992. Study on estimation of ground motion from seismic intensity[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **12**(3): 1–15 (in Chinese).
- 贾俊峰, 欧进萍. 2009. 近断层竖向地震动峰值特征 [J]. *地震工程与工程振动*, **29**(1): 44–49.
- Jia J F, Ou J P. 2009. Peak amplitude characteristics of vertical seismic ground motions in near-fault regions[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **29**(1): 44–49 (in Chinese).
- 贾俊峰, 欧进萍. 2010. 近断层竖向与水平向加速度反应谱比值特征 [J]. *地震学报*, **32**(1): 41–50.
- Jia J F, Ou J P. 2010. Vertical-to-horizontal acceleration response spectrum ratio of near-fault ground motion[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **32**(1): 41–50 (in Chinese).
- 贾晓琳. 2016. 基于随机有限断层模型的西安地区概率地震危险性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学: 24–40.

- Jia X L. 2016. *Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Xi'an Region Based on Stochastic Finite Fault Model*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology: 24–40 (in Chinese).
- 雷建成, 高孟潭, 俞言祥. 2007. 四川及邻区地震动衰减关系[J]. *地震学报*, **29**(5): 500–511.
- Lei J C, Gao M T, Yu Y X. 2007. Seismic motion attenuation relations in Sichuan and adjacent areas[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(5): 500–511 (in Chinese).
- 李恒, 李井冈, 王墩, 蔡永建. 2010. 竖向与水平向地震动加速度峰值比统计特征分析[J]. *地震研究*, **33**(2): 195–199.
- Li H, Li J G, Wang D, Cai Y J. 2010. Analysis of statistic characteristics of peak ratios in vertical and horizontal ground motion acceleration[J]. *Journal of Seismological Research*, **33**(2): 195–199 (in Chinese).
- 李伟, 俞言祥, 肖亮. 2017. 阿里亚斯强度衰减关系分析[J]. *地震学报*, **39**(6): 921–929.
- Li W, Yu Y L, Xiao L. 2017. Attenuation relationship of Arias intensity[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **39**(6): 921–929 (in Chinese).
- 李小明, 阎秀杰, 潘华. 2005. 中小震近场地震动估计中地震动衰减关系的适用性分析[J]. *地震工程与工程振动*, **25**(1): 1–7.
- Li X J, Yan X J, Pan H. 2005. Suitability analysis of ground motion attenuation relation in estimation of near-field ground motion for small and moderate earthquakes[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **25**(1): 1–7 (in Chinese).
- 李雪婧. 2017. 地震动参数之阿里亚斯烈度和累积绝对速度的特征及其在概率地震危险性分析中的应用[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 33–48.
- Li X J. 2017. *The Characteristics of Ground Motion Parameters of Arias Intensity and Cumulative Absolute Velocity and Their Application in Probabilistic Seismic Hazard Analysis*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 33–48 (in Chinese).
- 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[J]. *地震学报*, **43**(6): 768–786.
- Li X J, Xu W J, Gao M T. 2021. Characteristics of Arias intensity and Newmark displacement of strong ground motion in Lushan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **43**(6): 768–786 (in Chinese).
- 廖振鹏. 1989. 地震小区划: 理论与实践[M]. 北京: 地震出版社: 31–121.
- Liao Z P. 1989. *Seismic Microzoning: Theory and Practice*[M]. Beijing: Seismological Press: 31–121 (in Chinese).
- 廖振鹏, 郑天愉. 1997. 工程地震学在中国的发展[J]. *地球物理学报*, **40**(增刊): 177–191.
- Liao Z P, Zheng T Y. 1997. Development of engineering seismology in China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **40**(S): 177–191 (in Chinese).
- 刘充, 陶夏新. 2004. 基于随机振动理论的地震动峰值加速度简化衰减关系[C]//防震减灾工程研究与进展: 全国首届防震减灾工程学术研讨会论文集. 广州: 中国土木工程学会: 109–114.
- Liu C, Tao X X. 2004. Simplified attenuation relationship of PGA based on random vibration theory[C]//*Research and Progress on Earthquake Prevention and Disaster Mitigation Engineering: Proceedings of the First National Symposium on Earthquake Prevention and Disaster Mitigation Engineering*. Guangzhou: China Civil Engineering Society: 109–114 (in Chinese).
- 刘浪. 2010. 汶川地震地震动衰减特性分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 23–72.
- Liu L. 2010. *Analysis About Characteristics of Ground Motion Attenuation of Wenchuan Earthquake*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 23–72 (in Chinese).
- 刘平, 罗奇峰. 2013. 基于“映射圆”模型的汶川 8.0 级地震峰值加速度衰减关系[J]. *振动与冲击*, **32**(3): 75–78.
- Liu P, Luo Q F. 2013. Wenchuan 8.0 magnitude earthquake peak acceleration attenuation relationship based on a model of mapping circle[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **32**(3): 75–78 (in Chinese).
- 刘平, 罗奇峰. 2015. 汶川地震峰值加速度多圆组合模型的衰减关系[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, **46**(6): 2317–2323.
- Liu P, Luo Q F. 2015. Wenchuan earthquake peak acceleration attenuation relationship of multiple circle model[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, **46**(6): 2317–2323 (in Chinese).
- 刘平, 罗奇峰. 2017. NGA 数据库的多圆组合地震动衰减模型[J]. *哈尔滨工业大学学报*, **49**(6): 164–170.

- Liu P, Luo Q F. 2017. Multi-circle ground motions attenuation model of NGA database[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, **49**(6): 164–170 (in Chinese).
- 刘平, 罗奇峰, 陈兴周. 2020. 汶川地震竖向地震动衰减关系[J]. *哈尔滨工业大学学报*, **52**(2): 119–128.
- Liu P, Luo Q F, Chen X Z. 2020. Vertical ground motion attenuation relationship of Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, **52**(2): 119–128 (in Chinese).
- 刘陶钧. 2009. 反演区域参数建立加州地震动衰减关系[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学: 37–53.
- Liu T J. 2009. *Ground Motion Attenuation Relationship With Regional Parameters in California*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology: 37–53 (in Chinese).
- 齐娟, 罗开海, 杨小卫. 2014. 竖向地震动特性的统计分析[J]. *地震工程与工程振动*, **34**(增刊): 253–260.
- Qi J, Luo K H, Yang X W. 2014. Statistical analysis on characteristics of vertical ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, **34**(S): 253–260 (in Chinese).
- 石树中, 沈建文. 2003. 上海及邻近地区地震动衰减关系研究[J]. *中国地震*, **19**(4): 315–323.
- Shi S Z, Shen J W. 2003. A study on ground acceleration attenuation relationship in Shanghai and its adjacent region[J]. *Earthquake Research in China*, **19**(4): 315–323 (in Chinese).
- 陶正如, 陶夏新. 2017. 基于地震学的强地震动衰减关系[J]. *哈尔滨工业大学学报*, **49**(6): 171–177.
- Tao Z R, Tao X X. 2017. Ground motion attenuation relationships based on seismology[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, **49**(6): 171–177 (in Chinese).
- 田启文, 廖振鹏, 孙平善. 1986. 根据烈度资料估算我国地震动参数衰减规律[J]. *地震工程与工程振动*, **6**(1): 21–36.
- Tian Q W, Liao Z P, Sun P S. 1986. Estimation of ground motion attenuation in China based on intensity data[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **6**(1): 21–36 (in Chinese).
- 万卫. 2013. 汶川地震反应谱衰减关系研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 6–16.
- Wan W. 2013. *Study on Relationship of Response Spectrum Attenuation of Wenchuan Earthquake*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 6–16 (in Chinese).
- 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 阎秀杰. 2000. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. *中国地震*, **16**(2): 99–106.
- Wang S Y, Yu Y X, Gao A J, Yan X J. 2000. Development of attenuation relations for ground motion in China[J]. *Earthquake Research in China*, **16**(2): 99–106 (in Chinese).
- 王亚勇, 李虹. 1986. 考虑场地特征的强震地面运动参数的统计分析[J]. *地震工程与工程振动*, **6**(3): 67–77.
- Wang Y Y, Li H. 1986. Site dependent attenuation statistics of strong ground motion parameters[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **6**(3): 67–77 (in Chinese).
- 王玉石. 2010. 地震动强度及其特征分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 53–68.
- Wang Y S. 2010. *Analyses of Strong Ground Motion Intensity and Its Characteristics*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 53–68 (in Chinese).
- 肖亮, 俞言祥. 2014. 美国西部垂直向基岩强地面运动参数衰减关系研究[J]. *振动与冲击*, **33**(9): 179–184.
- Xiao L, Yu Y X. 2014. Attenuation relationships among vertical strong ground-motion parameters of rock sites in western US[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **33**(9): 179–184 (in Chinese).
- 谢俊举, 李小军, 温增平, 周宝峰. 2018. 芦山7.0级地震近断层地震动的方向性[J]. *地球物理学报*, **61**(4): 1266–1280.
- Xie J J, Li X J, Wen Z P, Zhou B F. 2018. Variations of near-fault strong ground motion with directions during the 2013 Lushan $M_{\text{s}}7.0$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **61**(4): 1266–1280 (in Chinese).
- 谢俊举, 温增平, 高孟潭, 胡聿贤, 何少林. 2010. 2008年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征[J]. *地球物理学报*, **53**(8): 1796–1805.
- Xie J J, Wen Z P, Gao M T, Hu Y X, He S L. 2010. Characteristics of near-fault vertical and horizontal ground motion from the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(8): 1796–1805 (in Chinese).
- 徐龙军, 谢礼立. 2007. 竖向地震动加速度反应谱特性[J]. *地震工程与工程振动*, **27**(6): 17–23.
- Xu L J, Xie L L. 2007. Characteristics of acceleration response spectra for vertical ground motions[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **27**(6): 17–23 (in Chinese).
- 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[J]. *地震学报*, **40**(6): 809–819.

- Xu P B, Wen R Z. 2018. The prediction equations for the significant duration of strong motion in Chinese mainland[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **40**(6): 809–819 (in Chinese).
- 杨帆, 罗奇峰. 2010a. 基于四区域椭圆模型的汶川 8.0 地震加速度峰值衰减关系拟合[J]. 振动与冲击, **29**(5): 136–140.
- Yang F, Luo Q F. 2010a. Wenchuan 8.0 rank earthquake acceleration peak attenuation curve based on a four-area elliptical model[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **29**(5): 136–140 (in Chinese).
- 杨帆, 罗奇峰. 2010b. 汶川地震的 6 区域模型加速度峰值衰减关系[J]. 土木建筑与环境工程, **32**(5): 29–34.
- Yang F, Luo Q F. 2010b. Fitting of acceleration peak attenuation with six-area model for Wenchuan 8.0 magnitude earthquake[J]. *Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering*, **32**(5): 29–34 (in Chinese).
- 喻焜, 李小军. 2012. 基于 NGA 模型的汶川地震区地震动衰减关系[J]. 岩土工程学报, **34**(3): 552–558.
- Yu T, Li X J. 2012. Attenuation relationship of ground motion for Wenchuan earthquake region based on NGA model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **34**(3): 552–558 (in Chinese).
- 喻焜, 崔建文, 李小军, 杨黎薇. 2014. 川滇地区中小震地震动衰减特征分析[J]. 中国地震, **30**(3): 409–418.
- Yu T, Cui J W, Li X J, Yang L W. 2014. Analysis of ground motion attenuation characterization for moderate earthquakes in the Sichuan-Yunnan region[J]. *Earthquake Research in China*, **30**(3): 409–418 (in Chinese).
- 俞言祥. 2002. 长周期地震动衰减关系研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 94–119.
- Yu Y X. 2002. *Study on Attenuation Relationships of Long Period Ground Motions*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 94–119 (in Chinese).
- 张斌, 俞言祥, 李小军, 王玉石, 荣棉水. 2021a. 西南地区水平向峰值速度、峰值位移衰减关系研究[J]. 地球物理学报, **64**(8): 2733–2748.
- Zhang B, Yu Y X, Li X J, Wang Y S, Rong M S. 2021a. Ground motion attenuation relationship of horizontal component of PGV and PGD in Southwest China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **64**(8): 2733–2748 (in Chinese).
- 张斌, 李小军, 林国良, 荣棉水, 俞言祥, 王玉石, 傅磊. 2021b. 2021 年 5 月 21 日漾濞 $M_s 6.4$ 地震近场地震动特征和方向性效应分析[J]. 地球物理学报, **64**(10): 3619–3631.
- Zhang B, Li X J, Lin G L, Rong M S, Yu Y X, Wang Y S, Fu L. 2021b. Analysis of strong ground motion characteristics and directivity effect in the near-field for the May 21, 2021 $M_s 6.4$ Yangbi earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **64**(10): 3619–3631 (in Chinese).
- 周锡元, 王广军, 苏经宇. 1990. 场地、地基、设计地震[M]. 北京: 地震出版社: 133–158.
- Zhou X Y, Wang G J, Su J Y. 1990. *Site, Foundation, Design Earthquake*[M]. Beijing: Seismological Press: 133–158 (in Chinese).
- 周锡元, 徐平, 王国权, 闫维明. 2006. 1999 年台湾集集地震近断层竖向与水平反应谱比值的研究[J]. 地震地质, **28**(3): 325–335.
- Zhou X Y, Xu P, Wang G Q, Yan W M. 2006. A case study on near fault vertical to horizontal response spectral ratio from the 1999, Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **28**(3): 325–335 (in Chinese).
- 周正华, 周雍年, 赵刚. 2002. 强震近场加速度峰值比和反应谱统计分析[J]. 地震工程与工程振动, **22**(3): 15–18.
- Zhou Z H, Zhou Y N, Zhao G. 2002. Statistical analysis of peak ratios and response spectra of near-field accelerograms[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **22**(3): 15–18 (in Chinese).
- 周正华, 周雍年, 卢滔, 杨程. 2003. 竖向地震动特征研究[J]. 地震工程与工程振动, **23**(3): 25–29.
- Zhou Z H, Zhou Y N, Lu T, Yang C. 2003. Study on characteristics of vertical ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **23**(3): 25–29 (in Chinese).
- 周正华, 林淋, 王玉石, 王伟. 2007. 竖向地震动反应谱[J]. 防灾减灾工程学报, **27**(增刊): 33–42.
- Zhou Z H, Lin L, Wang Y S, Wang W. 2007. Response spectra of vertical ground motion[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, **27**(S): 33–42 (in Chinese).
- Abrahamson N A, Shedlock K M. 1997. Overview[J]. *Seismol Res Lett*, **68**(1): 9–23.
- Abrahamson N A, Kuehn N M, Walling M, Landwehr N. 2019. Probabilistic seismic hazard analysis in California using non-ergodic ground motion models[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **109**(4): 1235–1249.
- Arias A. 1970. A measure of earthquake intensity[G]// *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. Cambridge: MIT Press:

438–483.

- Boore D M, Joyner W B, Fumal T E. 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work[J]. *Seismol Res Lett*, **68**(1): 128–153.
- Bozorgnia Y, Campbell K W. 2004. The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra[J]. *J Earthq Eng*, **8**(2): 175–207.
- Bozorgnia Y, Campbell K W. 2016. Vertical ground motion model for PGA, PGV, and linear response spectra using the NGA-West2 database[J]. *Earthq Spectra*, **32**(2): 979–1004.
- Bozorgnia Y, Abrahamson N A, Atik L A, Ancheta T D, Atkinson G M, Baker J W, Baltay A, Boore D M, Campbell K W, Chiou B S J, Darragh R, Day S, Donahue J, Graves R W, Gregor N, Hanks T, Idriss I M, Kamai R, Kishida T, Kottke A, Mahin S A, Rezaeian S, Rowshandel B, Seyhan E, Shahi S, Shantz T, Silva W, Spudich P, Stewart J P, Watson-Lamprey J, Wooddell K, Youngs R. 2014. NGA-West2 research project[J]. *Earthq Spectra*, **30**(3): 973–987.
- Bozorgnia Y, Abrahamson N A, Ahdi S K, Ancheta T D, Atik L A, Archuleta R J, Atkinson G M, Boore D M, Campbell K W, Chiou B S J, Contreras V, Darragh R B, Derakhshan S, Donahue J L, Gregor N, Gulercce Z, Idriss I, Ji C, Kishida T, Kottke A R, Kuehn N, Kwak D Y, Kwok A O L, Lin P, Macedo J, Mazzoni S, Midorikawa S, Muin S, Parker G A, Rezaeian S, Si H J, Silva W J, Stewart J P, Walling M, Wooddell K, Youngs R R. 2022. NGA-Subduction research program[J]. *Earthq Spectra*, **38**(2): 783–798.
- Campbell K W. 1981. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **71**(6): 2039–2070.
- Campbell K W. 1997. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra[J]. *Seismol Res Lett*, **68**(1): 154–179.
- Chiou B, Darragh R, Gregor N, Silva W. 2008. NGA project strong-motion database[J]. *Earthq Spectra*, **24**(1): 23–44.
- der Kiureghian A, Ang A H S. 1977. A fault-rupture model for seismic risk analysis[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **67**(4): 1173–1194.
- Duke C M. 1972. *Effects of Site Classification and Distance on Instrumental Indices in the San Fernando Earthquake*[M]. Los Angeles: School of Engineering and Applied Science, University of California, 21–28.
- Esteva L, Rosenblueth E. 1964. Spectra of earthquakes at moderate and large distances[J]. *Soc Mex Ing Sismica, Mex*, **2**: 1–18.
- Esteva L. 1970. Seismic risk and seismic design decisions[G]// *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. Cambridge: MIT Press: 142–182.
- Gregor N J, Bolt B A. 1997. Peak strong motion attenuation relations for horizontal and vertical ground displacements[J]. *J Earthq Eng*, **1**(2): 275–292.
- Housner G W. 1965. Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault[C]// *Proceedings of the Third World Conference on Earthquake Engineering*. New Zealand: International Association for Earthquake Engineering: 94–115.
- Idriss I M. 1991. *Procedures for Selecting Earthquake Ground Motions at Rock Sites*[R]. California: University of California, Davis: A3–4.
- Ji D F, Liu J, Wen W P, Zhai C H, Wang W, Katsanos E I. 2021. Prediction of cumulative absolute velocity based on refined second-order deep neural network[J]. *J Earthq Eng*, early access. doi: 10.1080/13632469.2021.1985017.
- 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]. *Bull Seismol Soc Am*, **71**(6): 2011–2038.
- Kanai K. 1961. An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions[J]. *Bull Earthq Res Inst*, **39**(1): 85–95.
- Kunnath S K, Erduran E, Chai Y H, Yashinsky M. 2008. Effect of near-fault vertical ground motions on seismic response of highway overcrossings[J]. *J Bridge Eng*, **13**(3): 282–290.
- Li X L, Zhai C H, Wen W P, Xie L L. 2020. Ground motion prediction model for horizontal PGA, 5% damped response spectrum in Sichuan-Yunnan region of China[J]. *J Earthq Eng*, **24**(11): 1829–1866.
- 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 P, Ren T J. 2022. Arias intensity attenuation relationship in Sichuan-Yunnan region, China[J/OL]. *Bull Earthq Eng*. doi: 10.1007/s10518-022-01467-z.

- Newmark N M, Hall W J. 1982. *Earthquake Spectra and Design*[M]. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Institute: 73–83.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. 2015. *NGA-East: Median Ground-Motion Models for The Central and Eastern North America Region*[R]. Berkeley: University of California (Berkeley): 1–9.
- Papazoglou A J, Elnashai A S. 1996. Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion[J]. *Earthq Eng Struct D*, **25**(10): 1109–1137.
- Power M, Chiou B, Abrahamson N, Bozorgnia Y, Shantz T, Roblee C. 2008. An overview of the NGA project[J]. *Earthq Spectra*, **24**(1): 3–21.
- Sadigh K, Chang C Y, Egan J A, Makdisi F, Youngs R R. 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data[J]. *Seismol Res Lett*, **68**(1): 180–189.
- Stewart J P, Boore D M, Seyhan E, Atkinson G M. 2016. NGA-West2 equations for predicting vertical-component PGA, PGV, and 5%-damped PSA from shallow crustal earthquakes[J]. *Earthq Spectra*, **32**(2): 1005–1031.
- Tang Y X, Lam N, Tsang H H, Lumantarna E. 2022. An adaptive ground motion prediction equation for use in low-to-moderate seismicity regions[J]. *J Earthq Eng*, **26**(5): 2567–2598.
- Wang D, Xie L L. 2009. Attenuation of peak ground accelerations from the great Wenchuan earthquake[J]. *Earthq Eng Eng Vib*, **8**(2): 179–188.
- Wang D, Xie L L. 2010. Study on response spectral acceleration from the great Wenchuan, China earthquake of May 12, 2008[J]. *J Earthq Eng*, **14**(6): 934–952.
- Wessel P, Luis J F, Uieda L, Scharroo R, Wobbe F, Smith W H F, Tian D. 2019. The Generic Mapping Tools version 6[J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **20**(11): 5556–5564.
- Xie J J. 2019. Strong-motion directionality and evidence of rupture directivity effects during the Chi-Chi $M_w 7.6$ earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **109**(6): 2367–2383.
- Xie J J, Li X J, Wen Z P, Wu C Q. 2014. Near-source vertical and horizontal strong ground motion from the 20 April 2013 $M_w 6.8$ Lushan earthquake in China[J]. *Seismol Res Lett*, **85**(1): 23–33.
- Xie J J, Li X J, Wen Z P, Jia L, An Z, Cui J W, Lin G L, Zhang Q, Jiang P, Xie Q C, Wang P F, Zimmaro P, Stewart J P. 2022. Soil profile database and site classification for national strong-motion stations in western China[J]. *Seismol Res Lett*, **93**(3): 1930–1942.
- Xing H, Zhao J X. 2021. A comparison of ground-motion parameters for the vertical components from the western and the south-western parts of China with recent ground-motion prediction equations[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **111**(2): 916–931.
- Zhang B, Yu Y X, Li X J, Wang Y S. 2022. Ground motion prediction equation for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5% damped acceleration response spectra at periods ranging from 0.033 to 8.0 s in Southwest China[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **159**: 107297.
- Zhao J X, Jiang F, Ma Y, Zhou J, Cheng Y, Chang Z W. 2017. Ground-motion prediction equations for the vertical component from shallow crustal and upper-mantle earthquakes in Japan using site classes as the site term[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **107**(5): 2310–2327.