

薄景山, 万卫, 彭达, 等. 我国黄土高原地区地震动衰减关系研究的若干进展[J]. 地震工程学报, 2024, 46(1): 182-198. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230515003
BO Jingshan, WAN Wei, PENG Da, et al. Advancements in ground motion attenuation relationship in the Loess Plateau region of China[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(1): 182-198. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230515003

我国黄土高原地区地震动衰减关系研究的若干进展

薄景山^{1,2,3,4}, 万卫^{1,2,3,4}, 彭达^{1,2}, 段玉石^{1,2,3,4}, 李琪^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 防灾科技学院地质工程学院, 河北 三河 065201;
4. 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: 地震动的衰减关系是指地震动随震级、距离和场地条件等变化的经验关系, 近年来在我国亦被称为地震动预测方程, 是估计地震动及其影响场的主要方法之一, 在地震区划和重大工程场地地震安全性评价中被广泛应用。黄土是一种特殊土, 在我国广泛分布。我国黄土高原地区地质构造复杂, 新构造活动强烈, 中强地震频发, 地震动的衰减关系有其特殊性, 总结我国黄土高原地区地震动衰减关系的研究成果对促进黄土高原地区抗震研究有重要意义。在简要介绍国内外地震动衰减关系研究的基础上, 全面系统地总结我国学者在黄土高原地区的地震烈度衰减关系, 基岩和土层场地地震动峰值加速度、峰值速度、峰值位移以及反应谱衰减关系方面的研究成果; 评述和讨论在黄土覆盖地区地震动衰减研究领域存在的问题和今后的研究方向。文章的研究工作对从事黄土高原地区地震工程研究的科技人员有重要参考价值。

关键词: 黄土高原地区; 地震烈度; 地震动; 衰减关系; 基岩; 土层; 研究进展

中图分类号: P319.56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2024)01-0182-17
DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230515003

Advancements in ground motion attenuation relationship in the Loess Plateau region of China

BO Jingshan^{1,2,3,4}, WAN Wei^{1,2,3,4}, PENG Da^{1,2}, DUAN Yushi^{1,2,3,4}, LI Qi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China;
2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, Heilongjiang, China;
3. College of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China;
4. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe 065201, Hebei, China)

Abstract: The attenuation relationship of seismic ground motion is a crucial empirical tool used to estimate the relationship between seismic ground motion and various factors. These factors include earthquake magnitude, distance, and site conditions. Recently, this tool is also called the

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1939209); 中央高校基本科研业务专项(ZY20215114)

第一作者简介: 薄景山(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程抗震研究。E-mail: bojingshan@163.com。

通信作者: 万卫(1988—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事地震动衰减和震害预测研究。E-mail: Wanshiruyi516@126.com。

ground motion prediction equation in China, which is one of the primary methods for estimating seismic ground motion and its influence field. Therefore, it is widely used in seismic zoning and seismic safety evaluation of major engineering sites. Loess is a special soil type that is widely distributed throughout China. In the Loess Plateau of China, which has a complex geological structure, the neotectonic activity is strong and medium-to-strong earthquakes occur frequently. So, the attenuation relationship of seismic motion in this area is unique and complex. Therefore, summarizing the research findings of the ground motion attenuation relationship in the Loess Plateau region of China is significant for promoting seismic research in this area. This paper provides a comprehensive and systematic summary of the research results of Chinese scholars on the attenuation relation of seismic intensity, peak ground acceleration, peak ground velocity, and peak ground displacement in the bedrock and soil sites of the Loess Plateau region. This study also reviews and discusses existing problems and future research directions in the field of ground motion attenuation research in the areas covered with loess. The research results have a significant reference value for scientific and technological personnel engaged in earthquake engineering research in the Loess Plateau region.

Keywords: Loess Plateau area; seismic intensity; ground motion; attenuation relationship; bedrock; soil layer; research process

0 引言

中国的黄土主要分布在西北、华北和东北地区,尤其集中分布在陕西、甘肃、山西和宁夏等省区,并具有沉积厚度大、持续时间长、分布范围广的特点。中国黄土的分布面积高达 64 万 km^2 , 约占中国大陆面积的 6.67%, 占世界黄土覆盖面积的 4.9%^[1]。黄土高原地处我国南北地震带和青藏高原东北缘地震带上,地质构造复杂,新构造运动强烈,局部地形多样,沟壑纵横,是我国中强地震频发、特大地质灾害发育的主要地区。

随着我国城镇化建设的迅速发展和“一带一路”倡议的深入推进,黄土高原地区已成为我国社会经济发展重心战略转移的重点区域,地震灾害已成为制约城镇和重大基础设施建设的突出问题。近年来,我国学者针对地震灾害问题开展了大量的研究工作,在黄土地区地震动衰减方面取得了一系列研究成果。地震动的衰减问题是黄土高原地区工程地震研究的核心问题之一,是研究地震灾害的基础,也是估计工程建设场地地震动的主要方法。地震动衰减关系是黄土高原地区地震区划和重大工程场地地震安全性评价的重要内容之一。

地震动是指由震源释放出来的地震波引起的地表及近地表介质的振动^[2]。地震动通常用地震动物理参数和地震动宏观参数来表示,地震动的物理参数主要包括地震动峰值加速度、峰值速度、峰值位移、反应谱、持时和强度包络线参数等,地震动的宏

观参数通常指地震烈度。刘恢先教授对烈度的定义是“地震烈度是地震时一定地点的地面震动的强弱程度的尺度,是指该地点范围内的平均水平而言”^[3]。在地震动衰减关系研究中,主要考虑地震的震源、地震波传播介质和场地影响三个主要因素。本文在简要介绍国内外地震动衰减模型和衰减关系研究的基础上,重点总结和归纳了我国学者在黄土高原地区地震烈度、地震动峰值参数和反应谱衰减关系方面的研究成果和现状。本文的工作对进一步促进黄土高原地区地震动衰减关系的研究有重要的理论价值和工程意义。

1 地震动衰减关系研究的概况

学术界对地震动衰减的认识源于对地震宏观震害现象的考察。1564 年,意大利人 Gastaldi 在考察滨海阿尔卑斯地震时已经注意到了不同地区地震破坏程度不同^[4],并用不同的颜色表示这种差别。1874 年意大利人 Rossi 编制了最早有实用价值的地震烈度表,并作为地震现场考察编制地震烈度分布图的依据。此后,大量地震烈度分布图的积累为研究地震烈度衰减关系提供了丰富的资料。这时人们已经意识到地震的破坏程度和震中距有关。

1890 年,英国学者 Milne、Ewing 和 Gray 共同研制了可以精确测量地震时地震位移的现代地震仪^[5],20 世纪初在英国的地震观测中应用,并能够较准确的确定地震的震中位置。1931—1932 年,日

本学者 Suyehiro 受美国土木工程学会的邀请在美国各大学演讲, 题目为“Engineering Seismology”^[6]。Suyehiro 在演讲中强调了需要关注破坏性地震动的观测记录和建筑物振动性能的测量资料, 这引起了美国海岸与大地测量局的重视。1932 年, 由美国工程师 Freeman 主持研制出了世界上第一台模拟式强震加速度仪(USCGS 型), 并投入使用。同年, 在美国长滩利用该仪器获取了世界强震动观测史上第一条强震记录。强震观测提供的加速度时程曲线为提取地震动的物理参数提供了数据资料, 为地震动衰减关系研究奠定了基础。

1935 年, 美国地震学家 Richter 通过对美国南加州地区浅源地震的研究提出了衡量地震大小的标度和计算公式, 并在美国学者 Wood 的建议下采用震级“magnitude”这一名词, 以区别于烈度“intensity”^[7]。在 Richter 提出近震震级(M_L)计算公式后, 美国地震学家 Gutenberg 给出了面波震级(M_S)和体波震级(M_b)的定义和计算公式^[8-9]。震级概念和计算方法的提出及应用为研究地震动的衰减与震级的关系提供了基础。1943 年美国地震学家 Biot 完整地提出了反应谱的概念, 并给出了世界上第一个地震反应谱; 1947 年, 美国地震工程学家 Housner 将反应谱应用于工程抗震设计^[10]。

可见, 上述地震学和工程地震学的研究和发展为地震动衰减关系研究奠定了基础。同时, 工程地震学、地震工程学和结构抗震技术的发展也对地震动衰减关系研究提出了迫切需求, 特别是地震危险性分析、地震区划和重大工程场地地震安全性评价等工作极大地推动了地震动衰减关系研究和发展。

地震动衰减关系研究可追溯到 20 世纪 40 年代。Gutenberg 和 Richter 依据美国加州地区的地震烈度和强震观测资料, 在研究震级、震中烈度、震中加速度和地震释放能量关系的基础上, 给出了震中加速度与震级的统计关系式和加速度随距离的衰减关系式^[11-12]。

我国地震动衰减关系的研究工作大致始于 20 世纪 60 年代^[13], 70 年代后主要是围绕全国地震区划图的编制和重大工程抗震设计的需要开展了大量有关地震动衰减关系的研究工作。我国研究者霍俊荣^[14]、王国新^[15]、俞言祥^[16]、王海江^[17]、肖亮^[18-19]、卢建旗^[20]、万卫^[21]、陶正如等^[22]、刘平等^[23]对不同时期地震动衰减关系的研究做了比较全面的总结和评述。总体上看, 地震动衰减研究是以实际的观测资料为基础, 它强烈依赖现场调查和观测资料的积

累, 资料的数量和质量决定了所得结果的可靠性, 并且地震动衰减关系的区域性特点显著。

地震动衰减关系的研究方法主要由统计分析方法、强地震动模拟方法(也称半理论半经验方法)和 Next Generation of Ground-Motion Attenuation Models(简称 NGA)方法等。统计分析方法始于 20 世纪 40 年代, 主要是统计地震烈度、峰值加速度、峰值速度和反应谱谱值随震级与震中距的关系, 这一方法存在的主要问题是由于统计资料不够充分而使拟合的结果具有较大的误差。

强地震动模拟方法始于 20 世纪 80 年代, 这一方法主要是基于震源模型和震源辐射谱模型, 建立震源和地震波传播的数学模型, 给出理论加速度图, 并用以估计给定地点的基岩地震动。该方法主要是针对强震观测资料缺乏和统计分析方法无法考虑地震类型、断层破裂过程以及传播介质耗能特性等问题而提出的。该方法主要存在深部介质参数获取及可靠性检验的困难, 给出的计算结果常与实际地震动有较高的偏离。

NGA 方法源自美国在 21 世纪初开始的 NGA 计划, 这是一项多学科参与的研究项目, 其目的是在广泛收集全球强震观测资料的基础上, 综合考虑地震学、地质学、岩土工程等方面的信息, 通过开展广泛的相互合作来建立新的地震动衰减关系。2008 年, NGA 计划的 5 个专家组分别提出了 5 组衰减关系^[24-28], 较好地表述了与地震动有关的多种效应的影响, 已被美国地震动区划图编图采纳。除上述方法外, 在缺乏强震记录的地区, 由于抗震设计等的需求, 研究者还提出了利用烈度资料估计缺乏强震记录地区的地震动的方法。Gutenberg 等^[11]、Trifunca 等^[29]、McGuire^[30-31]、Campbell^[32]、Hasegawa 等^[33]、胡聿贤等^[34-35]、田启文等^[36]、霍俊荣等^[37]在这方面做了大量的研究工作。我国在地震动参数区划图的编制中, 参考并使用了美国西部地震资料, 通过转换方法建立了我国地震动参数衰减关系。

目前, 在上述地震动衰减关系研究方法中, 工程上常用的是统计分析方法。这一方法随着地震烈度和强震动观测资料的不断积累, 其结果的可靠性也在不断提高。统计分析方法主要涉及 4 个问题: (1)统计样本的数量和质量。在保证样本质量的前提下, 样本数量应满足统计的基本要求, 就地震动统计而言, 至少应有 10 个以上样本才能满足统计的要求。(2)地震动衰减模型, 即地震动衰减关系的函数

形式。理论上,地震动的衰减特征受震源、传播介质和场地条件的影响,因此在衰减模型中应包括描述震源的参数(通常用震级表示)、描述传播路径的参数(通常用距离表示)和描述场地条件的参数(用场地类型表示,基岩用 0 表示,硬土用 1 表示,软土用 2 表示)。学术界普遍认为,最早明确用震级 M 和距离 R 表示地震动衰减的模型是日本学者 Kanai 在 1961 年建立的^[38]。随着研究工作的深入和考虑因素的不断增加,地震动衰减模型越来越复杂,各国研究者提出了若干地震动衰减模型,本文总结了主要模型,并列于表 1。(3)回归方法,即衰减方程中系数的确定方法。最小二乘法是确定地震动衰减关系中系数最常用的方法,这是非线性多元回归问题,为了解决样本分布不均匀问题,常使用等权回归法;针对震级和距离的耦合问题,Joyner 等提出了两步回归法^[39];王国新等^[40]、肖亮等^[41]、Fukushima 等^[42]还提出了新的分步回归法。(4)地震动参数的

选择,主要包含地震动的宏观参数和物理参数。

在收集和整理地震样本资料的基础上,选定地震动衰减模型,利用统计回归的方法给出衰减模型中的系数值,从而确定地震动的衰减关系。杨伟松等^[43]总结了不同研究者给出的我国不同地区的烈度衰减关系,并给出了我国南北地震带的地震烈度衰减关系。本文整理了国内外部分地震动衰减关系列于表 2。限于篇幅,本文只给出烈度和峰值加速度的衰减关系。需要强调的是,地震烈度的衰减关系是对“平均场地”而言,且大多数为Ⅱ类场地。通常,地震烈度的衰减关系不区分场地的影响。由于土层场地对地震动物理参数影响的复杂性,土层场地地震动衰减的研究进展相对缓慢。目前我国工程界通常是先采用基岩衰减关系获得场地基岩的地震动参数,再利用土层地震反应分析技术确定土层场地的地震动参数。国外工程界对土层场地地震反应的处理方式与中国基本一致。

表 1 地震动衰减关系主要模型列表

Table 1 List of main models for ground motion attenuation relationship				
提出者	时间	衰减关系模型	说明	文献
Kanai	1961	$\lg a = C_1 + C_2 M + C_3 \lg R$	a 为加速度, M 为面波震级, R 为震中距; C_1 、 C_2 、 C_3 均为回归系数	[38]
Milne 等	1969	$\lg(a) = C_1 + C_2 M + \lg(\Delta^2 + C_3 e^{C_4 M})$	Δ 为震中距, C_4 为回归系数,其他同上	[44]
Esteva	1970	$\lg y = C_1 + C_2 M + C_3 \lg(R + R_0)$	y 为地震动参数, M 为面波震级, R 为震中距, R_0 为常数因子; C_1 、 C_2 、 C_3 均为回归系数	[45]
Duke 等	1972	$\lg y = C_1 + C_2 M + C_3 \lg(R + R_0) + C_4 R$	C_4 为回归系数,其他同上	[46]
Howell 等	1975	$I = A + BM - C \ln(R + R_0) - DR$	I 为距离震源或者震中 R 处的地震烈度, M 为震级, R_0 为预设常数; A 、 B 、 C 、 D 均为回归常数	[47]
陈达生等	1989	$I = A + BM - C_1 \ln(R_a + R_{0a}) - C_2 \ln(R_b + R_{0b}) + \epsilon$	C_1 、 C_2 为回归常数, R_a 和 R_b 烈度等震线长轴和短轴半径, R_{0a} 和 R_{0b} 分别为预设常数, ϵ 为不确定性,其他同上	[48]
霍俊荣	1989	$\lg y(M, R) = C_1 + C_2 M + C_3 M^2 + C_4 \lg[R + R_0(M)] + C_7 R$ $R_0(M) = C_5 \exp(C_6 M)$ Ⅰ型: $\lg y = C_1 + C_2 M + C_4 \lg[R + C_5]$ Ⅱ型: $\lg y = C_1 + C_2 M + C_4 \lg[R + C_5 \exp(C_6 M)]$ Ⅲ型: $\lg y = C_1 + C_2 M + C_3 M^2 + C_4 \lg[R + C_5 \exp(C_6 M)]$	y 为地震动参数, M 为震级, R 为震中距; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 和 C_7 均为回归常数	[14]
中国地震烈度区划图(1990)	1990	$I = a_0 + a_1 M - a_2 \ln(R + R_0)$	I 为地震烈度, M 为震级, R_0 为设定常数; a_0 、 a_1 、 a_2 均为回归常数	[49]
王国新等	2001	$\lg y = C + (\alpha + \beta M) \lg(R + R_0)$	y 为地震动参数, M 为震级, R 为距离, R_0 为描述距离饱和的常数; C 、 α 、 β 均为回归常数	[40]
Abrahamson 等	2008	当 $M \leq C_1$ 时, $f_1(M, R_{\text{rup}}) = a_1 + a_4(M - C_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - C_1)] \ln R$ 当 $M > C_1$ 时, $f_1(M, R_{\text{rup}}) = a_1 + a_5(M - C_1) + a_8(8.5 - M)^2 + [a_2 + a_3(M - C_1)] \ln R$ $R = \sqrt{R_{\text{rup}}^2 + C_4^2}$	C_1 为特定震级, C_4 为震源深度, M 为面波震级, R_{rup} 为最短破裂距; a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_8 均为回归常数	[24]
俞言祥等	2013	$\lg y = A + BM + C \lg(R + D e^{EM})$	y 为地震动参数, M 为面波震级, R 为震中距, A 、 B 、 C 、 D 、 E 均为回归系数。此式以震级 6.5 为界,可分别给出不同系数	[50]

表 2 部分地区地震烈度、峰值加速度衰减关系列表

Table 2 List of seismic intensity and peak acceleration attenuation relationships in some regions				
提出者	时间	衰减关系	说明	文献
Gutenberg 等	1956	美国加州地区: $\lg(a_0) = -2.1 + 0.82M - 0.027M^2$	a_0 为震中加速度, M 为震级, a_R 为距震中 R 处的加速度, R 为震中距; T_p 为记录的卓越周期, y_0 取 48 英里 (77.232 km)	[12]
		$a_R = a_0 \left(1 + \frac{R}{y_0}\right)^n, n = 1 + \frac{1}{(2.5T_p)}$		
Chandra	1979	美国 SanAndreas 地区: $I = 0.514 + 1.5M - 2.014\lg(R + 10)$	I 为场地烈度, M 为面波震级, R 为震中距 (km)	[51]
田启文等	1986	美国西部: $I = 0.058 + 1.5M - 0.839\ln \sqrt{R^2 + 6^2} - 0.009 \frac{1}{\sqrt{R^2 + 6^2}}$	同上	[36]
霍俊荣	1989	美国西部: $I = 3.524 + 1.047M - 2.55\lg(R + 10)$ $\lg a = -0.935 + 1.241M - 0.046M^2 - 1.904\lg(D + 0.326 \cdot 8e^{0.613 \cdot 5M})$	I 为场地烈度, a 为基岩峰值加速度, M 为面波震级, R 为震源距, D 为断层距	[14]
中国地震烈度区划图 (1990)	1990	中国东部长轴: $I = 6.046 + 1.480M - 2.081\ln(R + 25), S = 0.49$ 中国东部短轴: $I = 2.617 + 1.435M - 1.441\ln(R + 7), S = 0.56$ 中国西部长轴: $I = 5.643 + 1.538M - 2.109\ln(R + 25), S = 0.64$ 中国西部短轴: $I = 2.941 + 1.363M - 1.494\ln(R + 7), S = 0.61$	中国东部和西部的分界线是东经 105° ; I 为烈度, M 为面波震级, R 为震中距, S 为标准误差	[49]
汪素云等	2000	中国东部长轴: $\lg EPA = 2.304 + 0.747M - 2.590\lg[R + 2.789\exp(0.451M)], \sigma = 0.242$ 中国东部短轴: $\lg EPA = 1.184 + 0.585M - 1.764\lg[R + 1.046\exp(0.451M)], \sigma = 0.242$	给出了中国东部和西部的 EPA (Effective Peak Acceleration) 衰减关系, 本文只列出东部地区, EPA 为有效峰值加速度, M 为震级, R 为震中距, σ 为标准差	[52]
俞言祥等	2006	中国东部地区长轴: $\lg PGA = 2.027 + 0.548M - 1.902\lg[R + 1.700\exp(0.425M)], \sigma = 0.240$ 中国东部地区短轴: $\lg PGA = 1.035 + 0.519M - 1.465\lg[R + 0.381\exp(0.525M)], \sigma = 0.240$	给出了中国东部和西部的 PGA 衰减关系, 本文只列出东部地区; PGA 为峰值加速度, M 为面波震级, R 为震中距, σ 为标准差	[53]
俞言祥等	2013	新疆区长轴 6.5 级以下: $\lg a_E = 1.791 + 0.720M - 2.389\lg[R + 1.772e^{0.424M}], \sigma = 0.236$ 新疆区长轴 6.5 级以上: $\lg a_E = 3.403 + 0.472M - 2.389\lg[R + 1.772e^{0.424M}], \sigma = 0.236$ 新疆区短轴 6.5 级以下: $\lg a_E = 0.983 + 0.713M - 2.118\lg[R + 0.825e^{0.465M}], \sigma = 0.236$ 新疆区短轴 6.5 级以上: $\lg a_E = 2.610 + 0.463M - 2.118\lg[R + 0.825e^{0.465M}], \sigma = 0.236$	给出了全国不同分区的 a_E 衰减关系, 本文只列出新疆区; a_E 为有效峰值加速度, M 为面波震级, R 为震中距, σ 为标准差	[50]

2 黄土高原地区地震烈度衰减关系研究进展

地震烈度的评定指标主要包括房屋震害、人的感觉、器物反应、生命线工程震害、其他震害现象和仪器测定的地震烈度^[54]。由于在地震烈度评定中大多未提供详细的场地信息,这使得考虑场地条件的地震烈度衰减关系研究进展相对缓慢。实际上,场地条件对地震烈度的影响十分显著。早在 20 世纪 90 年代,孙平善等^[55]对华北地区平原和山区地震烈度衰减规律进行了比较研究,得出的结论是山区地震烈度较平原地震烈度衰减得快,当烈度衰减一度时,平原和山区的相应震中距增加的距离之比平均为 3/2;若综合震中烈度的影响,在相同震级时,山区 60 km 处的影响烈度大致相当于平原 100 km 处的影响烈度。霍俊荣等^[56]、郁曙君^[57]、苗庆杰等^[58]以及田家勇等^[59]的研究成果也充分地说明

了场地的地形地貌和岩土性质对地震烈度衰减的影响较大。上述研究工作表明,地震烈度的衰减与场地条件密切相关,具有强烈的区域特性,在不同区域内,根据场地条件统计分析地震烈度的衰减关系是烈度衰减研究的一个重要方向。必须强调,黄土是在我国分布十分广泛的特殊土,具有独特的动力学特性,针对黄土高原地区开展地震烈度衰减关系研究具有重大的理论和工程意义。

尽管对黄土地震灾害的研究早在 1920 年海原特大地震发生后就已经开始^[60],并且在编制地震烈度区划图^[61-62]和地震动参数区划图^[63-64]时涉及了黄土所在地区地震烈度的衰减问题,但针对黄土覆盖地区(主要是陕、甘、宁、青、蒙、晋、冀等省区)开展地震烈度衰减关系的研究却始于 20 世纪 80 年代。1989 年,阮爱国等^[65]根据黄土地区的地形地貌、黄土成因和厚度等条件,将研究区划分为甘肃西部及

青海东部、陕西盆地、陇东及陕北和汾渭河谷 4 个区段,利用研究区内 38 次历史地震等震线资料给出了 4 个区的地震烈度衰减关系。在此之后,若干研究者根据工程或研究工作的需要,在黄土地区或针对黄土高原地区开展了大量研究工作。本文将目前我

国不同研究者给出的黄土高原地区的地震烈度衰减关系进行了整理,并列于表 3。分析现有的研究成果不难发现,黄土覆盖地区的地震烈度衰减较附近的非黄土地区明显缓慢,震级越大这种现象越明显,这与宏观震害现象比较一致。

表 3 我国黄土高原地区有关地震烈度衰减关系列表					
Table 3 List of seismic intensity attenuation relationships in the Loess Plateau region of China					
提出者	时间	研究区域	衰减关系	说明	文献
阮爱国等	1989	西北黄土地区(分为 4 个区)	甘肃西部及青海东部: $I=0.167\ 4+1.5M-0.951\ 5\ln\sqrt{R^2+\sigma^2}-0.003\ 9\sqrt{R^2+h^2},\sigma=0.618\ 7$	未分长轴和短轴, I 为 R 处的地震烈度, R 为震中距, M 为面波震级;作者在回归统计中国西北黄土地区烈度资料时,令 $h=6$ km	[65]
			陇西盆地: $I=0.224+1.5M-0.987\ln\sqrt{R^2+\sigma^2}-0.002\ 3\sqrt{R^2+h^2},\sigma=0.613\ 4$		
			陇东及陕北: $I=-0.43+1.5M-0.853\ 9\ln\sqrt{R^2+\sigma^2}-0.006\ 1\sqrt{R^2+h^2},\sigma=0.799$		
			汾渭河谷: $I=-0.68+1.5M-0.676\ln\sqrt{R^2+\sigma^2}-0.005\ 0\sqrt{R^2+h^2},\sigma=0.85$		
陈达生等	1989	华北地震区	长轴方向: $I_a=3.727+1.429M-1.538\ln(R_a+2)$ 短轴方向: $I_b=1.483+1.429M-1.138\ln(R_b+4)$	M 为震级	[48]
孙平善等	1990	华北平原	$I=1.348M-3.064\lg(R+6)+3.113,\sigma=0.43$	利用等效线或等效半径统计; M 为震级, R 为震中距	[55]
温春生	1991	山西及邻区	长轴: $I=3.263+1.320M_S-1.298\ln(D+8),\sigma=0.69$ 短轴: $I=3.439+1.237M_S-1.294\ln(D+4),\sigma=0.63$	I 为地震烈度, M_S 为面波震级, D 为震中距;约束条件: $M_S\geqslant 5,5\leqslant D\leqslant 300$ km	[66]
丁伯阳等	1991	陕、甘、宁、晋四省(区)和青海、内蒙、河南、四川部分地区	等震线长轴: $I_L=3.830+1.370M-1.365\ln(R+20)-0.001\ 7(R+20),\delta=0.84$ 等震线短轴: $I_S=3.333+1.227M-1.281\ln(R+10),\delta=0.754$	I_L 和 I_S 为沿长轴和短轴烈度, M 为震级, R 为震中距, δ 为离差	[67]
林金瑛等	1993	河北及邻近地区	沿长轴方向: $I=4.649\ 6+1.4667M-1.754\ 3\ln(R+12)$ $r=0.953\ 3,\delta_I=0.503\ 8$ 沿短轴方向: $I=3.009\ 2+1.461\ 8M-1.576\ 9\ln(R+2)$ $r=0.954\ 5,\delta_I=0.547\ 8$	I 为 R 处的烈度, R 为震中距, M 为震级, r 为相关系数, δ_I 为方差	[68]
郁曙君	1995	中国东部平原和青藏高原外缘甘肃段	中国东部平原长轴: $I_a=0.791\ 1+2.279M-(0.953\ 0+0.162\ 2M)\ln(R+25),\sigma=0.723\ 5$	R 为震中距, M 为面波震级	[57]
			中国东部平原短轴: $I_b=-1.965+2.132\ 3M-(0.160\ 1+0.193\ 0M)\ln(R+7),\sigma=0.566\ 4$		
			青藏高原外缘甘肃段长轴: $I_a=0.342\ 4+2.2304\ M-(0.793\ 0+0.158\ 0M)\ln(R+25),\sigma=0.733\ 9$		
			青藏高原外缘甘肃段短轴: $I_b=-2.007\ 2+2.081\ 8M-(0.103\ 0+0.182\ 5M)\ln(R+7),\sigma=0.581\ 5$		
汪素云等	2000	中国东部和西部	中国东部长轴: $I=5.019+1.446M-4.136\lg(R+24),\sigma=0.517$	M 为震级, R 为震中距(注:甘青宁地区和华北地区衰减关系来源于中国地震动参数区划图编制内部资料)	[52]
			中国东部短轴: $I=2.240+1.446M-3.070\lg(R+9),\sigma=0.517$		
			中国西部长轴: $I=5.253+1.398M-4.146\lg(R+26),\sigma=0.632$		
			中国西部短轴: $I=2.019+1.398M-2.943\lg(R+8),\sigma=0.632$		
			甘宁青地区长轴: $I=5.774+1.376M-4.287\lg(R+25),\sigma=0.668$		
			甘宁青地区短轴: $I=2.342+1.376M-3.030\lg(R+7),\sigma=0.668$		
王兰民等	2003	甘肃、陕西、山西	华北地区长轴: $I=3.758+1.434M-3.613\lg(R+15),\sigma=0.498$	M 为震级, R 为震中距	[69]
			华北地区短轴: $I=2.008+1.434M-2.958\lg(R+7),\sigma=0.498$		
			甘肃黄土地区: $I_a=5.341\ 4+1.510\ 2M-2.103\ 3\ln(R+20),\sigma=0.67$ $I_b=1.694\ 8+1.511\ 2M-1.534\ 5\ln(R+5),\sigma=0.63$		
			陕西黄土地区: $I_a=6.649\ 0+1.336\ 2M-1.831\ 1\ln(R+40),\sigma=0.652$ $I_b=2.443\ 6+1.261M-1.053\ 9\ln(R+5),\sigma=0.617$		
			山西黄土地区: $I_a=3.735\ 0+1.482M-3.748\ 0\lg(R+16),\sigma=0.48$		
			$I_b=1.743\ 0+1.482M-2.948\ 0\lg(R+25),\sigma=0.48$		

续表 1

提出者	时间	研究区域	衰减关系	说明	文献
沙海军等	2004	华北地区	$I_1=2.033+2.01M-(0.923+0.15M)\ln(R_1+27.035),\sigma=0.515$ $I_2=0.064+1.949M-(0.433+0.169M)\ln(R_2+13.073),\sigma=0.515$	I_1 和 I_2 为长轴和短轴在 R_1 和 R_2 处的烈度, R_1 和 R_2 为震中距	[70]
俞言祥等	2004	甘肃、宁夏、青海地区	长轴: $I=5.774+1.376M-4.287\lg(R+25),\sigma=0.668$ 短轴: $I=2.342+1.376M-3.030\lg(R+7),\sigma=0.668$	I 为地震烈度, M 为震级, R 为震中距	[71]
石玉成等	2005	甘肃省黄土地区	$I_a=5.341+1.510M-2.103\ln(R+20),\sigma=0.67$ $I_b=1.695+1.511M-1.535\ln(R+5),\sigma=0.63$	R 为震中距, M 为震级	[72]
周中红等	2010	甘肃地区	$I_a=4.864+1.464M-1.783\ln(R_a+22),\sigma_a=0.521$ $I_b=3.032+1.321M-1.343\ln(R_b+9),\sigma_b=0.520$	M 为震级	[73]
崔鑫等	2010	华北地区	长轴: $I=3.011\ 7+1.549\ 5M-1.350\ 9\ln(R+30),\sigma=0.329\ 1$ 短轴: $I=1.786\ 5+1.452\ 3M-1.115\ 5\ln(R+13),\sigma=0.340\ 2$	I 为地震烈度, R 为震中距, M 为面波震级	[74]
范文等	2011	陕北地区	陕北黄土高原区长轴: $I=3.144\ 7+1.517\ 9M-1.478\ 7\ln(R+17),\sigma=0.529$ 陕北黄土高原区短轴: $I=1.443\ 0+1.517\ 9M-1.234\ 7\ln(R+7.5),\sigma=0.529$ 关中平原区长轴: $I=3.763\ 4+1.410\ 1M-1.4834\ln(R+17),\sigma=0.581$ 关中平原区短轴: $I=2.263\ 6+1.410\ 1M-1.263\ 1\ln(R+8.5),\sigma=0.581$	I 为烈度, R 为震中距, M 为面波震级;采用多元稳健线性回归方法	[75]
肖亮等	2011	中国西部地区	长轴: $I=6.251\ 3+1.304\ 6M-4.449\ 6\lg(R+25),\sigma=0.676\ 1$ 短轴: $I=3.457\ 5+1.304\ 6M-3.424\ 6\lg(R+10),\sigma=0.676\ 1$	I 为烈度, R 为震中距, M 为面波震级	[76]
高娜等	2012	河北及邻近地区	沿长轴方向: $I=2.996+1.371M-1.358\ln(R+12),\sigma=0.432$ 沿短轴方向: $I=1.836+1.353M-1.182\ln(R+6),\sigma=0.418$	I 为 R 处的地震烈度, R 为震中距	[77]
俞言祥等	2013	全国,分为4个区	东部强震区: $I_a=5.712\ 3+1.362\ 6M-4.290\ 3\lg(R+25),\sigma=0.582\ 6$ $I_b=3.658\ 8+1.362\ 6M-3.540\ 6\lg(R+13),\sigma=0.582\ 6$ 中强地震区: $I_a=5.841\ 0+1.071\ 0M-3.657\ 0\lg(R+15),\sigma=0.520\ 0$ $I_b=3.944\ 0+1.071\ 0M-2.845\ 0\lg(R+7),\sigma=0.520\ 0$ 新疆区: $I_a=5.601\ 8+1.434\ 7M-4.489\ 9\lg(R+25),\sigma=0.592\ 4$ $I_b=3.611\ 3+1.434\ 7M-3.847\ 7\lg(R+13),\sigma=0.592\ 4$ 青藏区: $I_a=6.458\ 0+1.274\ 6M-4.470\ 9\lg(R+25),\sigma=0.663\ 6$ $I_b=3.368\ 2+1.274\ 6M-3.311\ 9\lg(R+9),\sigma=0.663\ 6$	R 为震中距, M 为面波震级;这四个区都涉及黄土地区	[50]
杨彦明等	2016	内蒙古中西部地区	阿拉善地区: $I_a=-4.149\ 4+2.139\ 5M-0.579\ 7\ln(R_a+11),\sigma=0.645\ 3$ $I_b=-4.960\ 5+2.189\ 8M-0.547\ 6\ln(R_b+1),\sigma=0.605\ 4$ 内蒙古中部: $I_a=2.751\ 7+1.261\ 0M-1.094\ 1\ln(R_a+12),\sigma=0.519\ 3$ $I_b=2.567\ 1+1.096\ 6M-0.933\ 8\ln(R_b+6),\sigma=0.536\ 2$	下标 a 、 b 分别表示长轴、短轴方向, I 为地震烈度, M 为面波震级	[78]
谷国梁等	2016	天津市及邻区	$I_a=4.612+1.022M-1.292\ln(R_a+10),\sigma=0.586$ $I_b=3.753+0.998M-1.134\ln(R_b+6),\sigma=0.532$	M 为面波震级	[79]
杨凡	2017	河北及邻区	$I_a=2.61+1.445M-1.264\ln(R+12),\sigma=0.348$ $I_b=1.602+1.411M-1.101\ln(R+6),\sigma=0.329$	M 为震级, R 为震中距	[80]
杨伟松等	2021	南北地震带所在地区	$I_a=7.475\ 3+1.209\ 3M-1.957\ 0\ln(R_a+34),\sigma=0.698$ $I_b=4.427\ 6+0.943\ 8M-1.185\ 7\ln(R_b+6),\sigma=0.584$	M 为震级	[43]

备注:表中 I_a 和 I_b 分别表示沿椭圆长轴和短轴的地震烈度; R_a 和 R_b 分别表示烈度等震线长轴半径和短轴半径; σ 、 σ_a 和 σ_b 均为标准差

3 黄土高原地区地震动峰值衰减关系的研究进展

地震动的特性通常由地震动时间过程的幅值、频谱和特时三个要素来表述。地震动峰值是表述地震动幅值的重要指标,主要包括峰值加速度、峰值速度和峰值位移等参数。由于在工程抗震设计中需要这些参数,因此在工程场地地震安全性评价中应根据抗

震设计的需要给出场地的地震动峰值,在地震动峰值的预测中需要建立地震动峰值的衰减关系。由于强震记录的缺乏,目前我国地震动峰值的衰减关系主要是利用胡聿贤提出的转换法建立出我国基岩的地震动峰值衰减关系^[34-35],并利用这一关系预测工程场地基岩的地震动参数。在给出场地基岩人工合成地震动时程的条件下,通常是通过土层反应分析方法计算供设计使用的土层地震动峰值加速度等参数^[81]。由

于土层场地复杂性和强震记录的缺乏,我国地震动峰值参数的衰减关系以基岩场地为主,土层场地地震动峰值参数衰减关系的研究进展相对缓慢。20 世纪 90 年代,霍俊荣等^[56]根据美国西部 291 个土层台站的强震记录给出了美国西部土层场地的峰值加速度、峰值速度和峰值位移的衰减关系。同时,霍俊荣等^[37]还通过转换的方法,利用美国西部的地震烈度和地震动峰值参数衰减关系给出了中国华北、华南、西南和西北 4 个分区基岩和土层的地震动峰值加速度、峰值速度和峰值位移的衰减关系。我国在编制国家标准 GB 18306—2001 时,利用转换的方法给出了中国东部和西部基岩的有效峰值加速度(Effective Peak Acceleration,简称 EPA)和有效峰值速度(Effective Peak Velocity,简称 EPV)的衰减关系^[63]。在编制国家标准 GB 18306—2015 时,同样利用转换方法给出了我国青藏区、新疆区、东部强震区和中强地震区 4 个分区的 EPA 和 EPV 衰减关系^[64]。从现有的文献资料看,针对黄土高原地区的地震动峰值参数衰减关系始于 20 世纪 80 年代,丁伯阳等^[82]将中国历史地震烈度资料区分为黄土区和基岩区进行统计,在此基础上,通过对比美国西部地区的资料,用烈度距离法给出了中国黄土高原地区的基岩地震动衰减关系,并提出把

黄土区的地震动参数以 0.6 向基岩区折减,或在基岩区以 1.67 向黄土区放大,以考虑土层放大的影响。杨帆等^[83]利用汶川特大地震在陕西、甘肃、青海和宁夏黄土地区土层场地的 1 221 条强震记录,通过直接拟合的方法给出了黄土高原地区水平向和竖直向加速度峰值衰减关系。目前,黄土地区地震动峰值参数衰减关系的研究主要是利用转换方法,以美国西部为参考区,利用转换方法给出黄土地区基岩地震动峰值参数的衰减关系。利用统计方法建立黄土地区地震动峰值参数衰减关系存在 3 方面的困难:(1)缺乏足够的强震记录,特别是不同场地类别的强震记录;(2)黄土场地尽管土的类别和性质比较单一,但地形复杂,若考虑黄土局部地形的条件确定地震动峰值参数的衰减关系就更加困难;(3)黄土高原地区覆盖层的厚度差别较大,覆盖层厚度对地震动峰值参数的衰减影响较大,综合考虑土层厚度的影响给出地震动峰值参数的衰减关系难度更大。本文收集和整理了黄土高原地区或与黄土地区有关的地震动峰值参数的衰减关系列于表 4。表中给出的主要是黄土高原地区基岩地震动峰值加速度、峰值速度和峰值位移的衰减关系,这些衰减关系大多是以美国西部为参考地区,通过转换方法给出的。

表 4 我国黄土高原地区有关地震动峰值参数衰减关系列表

Table 4 List of attenuation relationships of seismic peak parameters in the Loess Plateau region of China

提出者和文献	时间和研究区域	衰减关系	说明
田启文等 ^[36]	1986 华北地区	峰值加速度 $y(g)$: $\ln y = -3.0 + 0.803\ 8M - 1.171\ 2\ln R - 0.001\ 1R, \sigma = 0.86$ 峰值速度 $y(\text{cm/s})$: $\ln y = -0.424\ 7 + 0.775\ 9M - 0.668\ 3\ln R - 0.002\ 0R, \sigma = 0.88$	基岩,转换方法,美国西部作为参考地区; M 为面波震级, $R = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$, Δ 为断层距或震中距, h 是与震源深度有关的参数, σ 为残差
丁伯阳等 ^[82]	1988 中国黄土地区	峰值加速度 $y(g): \ln y = -3.066 + 0.234\ 7M - 0.413\ 7\ln R - 0.001\ 27R$ 建议用 1.67 放大系数给出黄土地区地表的峰值加速度	基岩,转换方法; M 为震级, R 为震中距, y 为峰值加速度
阮爱国等 ^[65]	1989 中国西北黄土地区	甘肃西部及青海东部峰值加速度 $y(g)$: $\ln y = -3.671\ 5 + 0.803\ 8M - 1.146\ 5\ln \sqrt{R^2 + 6^2} - 0.006\ 6\ \sqrt{R^2 + 6^2}, \sigma = 0.817\ 9$ 甘肃西部及青海东部峰值速度 $y(\text{cm/s})$: $\ln y = -0.487\ 9 + 0.779\ 5M - 0.644\ 4\ln \sqrt{R^2 + 6^2} - 0.007\ 4\ \sqrt{R^2 + 6^2}, \sigma = 0.845\ 0$ 陇西盆地峰值加速度 $y(g)$: $\ln y = -3.650\ 0 + 0.803\ 8M - 1.165\ 5\ln \sqrt{R^2 + 6^2} - 0.005\ 3\ \sqrt{R^2 + 6^2}, \sigma = 0.798\ 3$ 陇西盆地峰值速度 $y(\text{cm/s})$: $\ln y = -0.463\ 2 + 0.775\ 9M - 0.062\ 8\ln \sqrt{R^2 + 6^2} - 0.006\ 1\ \sqrt{R^2 + 6^2}, \sigma = 0.827\ 3$ 陕北高原及陇东地区峰值加速度 $y(g)$: $\ln y = -3.996\ 4 + 0.803\ 8M - 1.094\ 2\ln \sqrt{R^2 + 6^2} - 0.008\ 38\ \sqrt{R^2 + 6^2}, \sigma = 0.844\ 1$ 陕北高原及陇东地区峰值速度 $y(\text{cm/s})$: $\ln y = -0.801\ 5 + 0.775\ 9M - 0.593\ 9\ln \sqrt{R^2 + 6^2} - 0.009\ 1\ \sqrt{R^2 + 6^2}, \sigma = 0.868\ 7$ 汾渭地震带峰值加速度 $y(g)$: $\ln y = -4.130\ 4 + 0.803\ 8M - 0.998\ 9\ln \sqrt{R^2 + 6^2} - 0.008\ 2\ \sqrt{R^2 + 6^2}, \sigma = 0.858\ 3$ 汾渭地震带峰值速度 $y(\text{cm/s})$: $\ln y = -0.930\ 8 + 0.775\ 9M - 0.501\ 9\ln \sqrt{R^2 + 6^2} - 0.008\ 9\ \sqrt{R^2 + 6^2}, \sigma = 0.881\ 6$	基岩场地; M 为震级, R 为震中距, σ 为标准差;以美国西部为参考区,利用转换方法得到黄土 4 个分区的基岩峰值加速度和峰值速度

续表 1

提出者和文献	时间和研究区域	衰减关系	说明
温春生 ^[66]	1991 山西及邻近地区	转换方法 1: 长轴: $\ln A = 2.304 + 0.844 M_S - 0.758 \ln(D + 3), \sigma = 0.45$ 短轴: $\ln A = 2.519 + 0.813 M_S - 0.863 \ln(D + 4), \sigma = 0.43$ 转换方法 2: 长轴: $\ln A = -2.439 + 1 + 0.702 + 3 M_S - 1.173 + 2 \ln R - 0.001 + 0 R, \sigma = 0.85$ 短轴: $\ln A = -1.994 + 0 + 0.660 + 2 M_S - 1.335 + 1 \ln R + 0.000 + 5 R, \sigma = 0.84$	A 为基岩水平峰值加速度, M_S 为面波震级, D 为震中距, $R = \sqrt{D^2 + 36}$, σ 为标准偏差; 黄土场地由烈度转换, 基岩由美国西部资料转换
		华北地区基岩: $\lg A_a = 1.641 + 0.846 + 5 M - 2.445 + 6 \lg[R + 0.627 + 4 \exp(0.612 + 1 M)]$ $\lg A_b = 0.207 + 3 + 0.807 + 9 M - 2.026 + 4 \lg[R + 0.183 + 3 \exp(0.703 + 3 M)], \sigma = 0.260$ $\lg V_a = -1.086 + 3 + 0.991 + 1 M - 2.338 + 7 \lg[R + 0.580 + 4 \exp(0.615 + 3 M)]$ $\lg V_b = -1.992 + 4 + 0.955 + 1 M - 1.943 \lg[R + 0.169 \exp(0.706 + 8 M)], \sigma = 0.313$ $\lg D_a = -1.641 + 7 + 0.924 + 2 M - 2.095 + 3 \lg[R + 0.570 + 5 \exp(0.616 M)]$ $\lg D_b = -2.451 + 8 + 0.892 + 2 M - 1.741 + 8 \lg[R + 0.166 \exp(0.707 + 5 M)], \sigma = 0.351$ 华北地区土层: $\lg A_a = 1.524 + 1 + 0.679 + 5 M - 2.050 + 3 \lg[R + 0.638 + 2 \exp(0.611 + 5 M)]$ $\lg A_b = 0.716 + 2 + 0.646 + 8 M - 1.706 + 1 \lg[R + 0.186 + 6 \exp(0.702 + 6 M)], \sigma = 0.265$ $\lg V_a = -0.295 + 5 + 0.781 + 5 M - 1.935 + 6 \lg[R + 0.591 + 9 \exp(0.614 + 5 M)]$ $\lg V_b = -1.047 + 3 + 0.751 + 5 M - 1.607 + 0 \lg[R + 1.725 \exp(0.705 + 9 M)], \sigma = 0.295$ $\lg D_a = -1.797 + 5 + 0.932 + 5 M - 1.874 + 2 \lg[R + 0.540 + 2 \exp(0.618 + 1 M)]$ $\lg D_b = -2.517 + 2 + 0.904 + 4 M - 1.560 + 8 \lg[R + 0.156 + 8 \exp(0.709 + 8 M)], \sigma = 0.362$ 西北地区基岩: $\lg A_a = 1.205 + 0.863 + 3 M - 2.434 + 1 \lg[R + 0.688 + 8 \exp(0.626 + 7 M)]$ $\lg A_b = -0.027 + 2 + 0.828 M - 2.043 + 6 \lg[R + 0.152 + 5 \exp(0.716 + 3 M)], \sigma = 0.315$ $\lg V_a = -1.009 + 2 + 1.012 + 1 M - 2.334 \lg[R + 0.642 + 3 \exp(0.628 + 9 M)]$ $\lg V_b = -2.269 + 3 + 0.979 + 1 M - 1.964 \lg[R + 0.141 + 8 \exp(0.717 + 6 M)], \sigma = 0.379$ $\lg D_a = -1.659 + 3 + 0.944 + 0 M - 2.092 + 3 \lg[R + 0.632 + 2 \exp(0.629 + 4 M)]$ $\lg D_b = -2.710 + 4 + 0.914 + 6 M - 1.761 + 5 \lg[R + 0.139 + 5 \exp(0.718 + 1 M)], \sigma = 0.425$ 西北地区土层: $\lg A_a = 1.567 + 1 + 0.692 + 9 M - 2.049 + 3 \lg[R + 0.699 + 2 \exp(0.626 + 2 M)]$ $\lg A_b = 0.528 + 3 + 0.663 + 0 M - 1.719 + 7 \lg[R + 0.154 + 9 \exp(0.714 + 7 M)], \sigma = 0.321$ $\lg V_a = -0.292 + 5 + 0.797 + 8 M - 1.930 + 3 \lg[R + 0.653 + 6 \exp(0.612 + 8 M)]$ $\lg V_b = -1.265 + 1 + 0.770 + 3 M - 1.623 + 4 \lg[R + 0.144 + 4 \exp(0.717 + 0 M)], \sigma = 0.357$ $\lg D_a = -1.841 + 6 + 0.953 M - 1.874 + 9 \lg[R + 0.602 + 1 \exp(0.630 + 8 M)]$ $\lg D_b = -2.779 + 4 + 0.927 + 1 M - 1.580 + 9 \lg[R + 0.132 + 6 \exp(0.719 + 7 M)], \sigma = 0.439$	基岩和土层场地; A 、 V 、 D 分别表示有效峰值加速度(PGA)、有效峰值速度(PGV)和有效峰值位移(PGD), 单位分别为 gal, cm/s, cm; 角标 a 和 b 分别表示长轴和短轴, M 为面波震级, R 为震中距, σ 为标准差
林金瑛等 ^[68]	1993 河北及邻近地区	基岩长轴: $\ln a = 8.965 + 4 + 0.494 + 9 M - 1.851 + 2 \ln(R + 12), \sigma = 0.568 + 1$ 基岩短轴: $\ln a = 7.234 + 9 + 0.489 + 7 M - 1.664 \ln(R + 2), \sigma = 0.602 + 3$ 冲积层(中等场地)长轴方向: $\ln a = 6.009 + 2 + 0.545 + 7 M - 1.196 + 3 \ln(R + 12), \sigma = 0.683 + 8$ 冲积层(中等场地)短轴方向: $\ln a = 4.891 + 6 + 0.542 + 3 M - 1.075 + 4 \ln(R + 2), \sigma = 0.698 + 1$ 软弱土层长轴方向: $\ln a = 6.903 + 0.375 + 9 M - 1.103 + 3 \ln(R + 12)$ 软弱土层短轴方向: $\ln a = 0.871 + 7 + 0.372 + 8 M - 0.991 + 7 \ln(R + 2)$	以美国西部为参考地区, 通过转换方法得到; a 为加速度峰值, M 为震级; $R = \sqrt{H^2 + D^2}$, H 为等效震源深度, D 为震中距, σ 为标准差, 软弱土层未给出标准差
汪素云等 ^[52]	2000 中国东部和西部	中国东部 EPA 长轴: $\lg EPA = 2.304 + 0.747 M - 2.590 \lg[R + 2.789 \exp(0.451 M)], \sigma = 0.242$ 中国东部 EPA 短轴: $\lg EPA = 1.184 + 0.585 M - 1.764 \lg[R + 1.046 \exp(0.451 M)], \sigma = 0.242$ 中国东部 EPV 长轴: $\lg EPV = 0.013 + 0.793 M - 2.212 \lg[R + 2.789 \exp(0.451 M)], \sigma = 0.327$ 中国东部 EPV 短轴: $\lg EPV = -0.943 + 0.655 M - 1.506 \lg[R + 1.046 \exp(0.451 M)], \sigma = 0.327$ 中国西部 EPA 长轴: $\lg EPA = 2.492 + 0.786 M - 2.787 \lg[R + 3.269 \exp(0.451 M)], \sigma = 0.242$ 中国西部 EPA 短轴: $\lg EPA = 1.093 + 0.591 M - 1.794 \lg[R + 1.046 \exp(0.451 M)], \sigma = 0.242$ 中国西部 EPV 长轴: $\lg EPV = 0.207 + 0.829 M - 2.408 \lg[R + 3.269 \exp(0.451 M)], \sigma = 0.327$ 中国西部 EPV 短轴: $\lg EPV = -1.002 + 0.661 M - 1.55 \lg[R + 1.046 \exp(0.451 M)], \sigma = 0.327$	基岩场地; EPA 和 EPV 分别表示有效峰值加速度、有效峰值速度; M 为震级, R 为震中距, σ 为标准差; 以美国西部为参考地区, 通过转换方法得到

续表 2

提出者和文献	时间和研究区域	衰减关系	说明
王国新等 ^[15]	2001 华北地区	$\lg PGA=4.56-(4.189-0.424M)\lg(R+13.6),\sigma=0.173$	PGA 为峰值加速度, M 为震级, R 为距离
王兰民 ^[69]	2003 中国黄土地区	长轴方向: $\lg A=0.849+0.941M-2.654\lg(R+0.579e^{0.626M}),\sigma=0.70$ 短轴方向: $\lg A=-0.483+0.900M-2.195\lg(R+0.124e^{0.725M}),\sigma=0.70$	黄土地区基岩场地, A 为峰值加速度, 转换方法, M 为震级, R 为震中距, σ 为均方差
俞言祥等 ^[71]	2004 宁夏、甘肃、青海地区	长轴方向: $\lg A=0.617+1.163M-0.046M^2-2.207\lg[R+1.694\exp(0.446M)],\sigma=0.232$ 短轴方向: $\lg A=-0.644+1.080M-0.043M^2-1.626\lg[R+0.255\exp(0.570M)],\sigma=0.232$	基岩, 转换方法, M 为震级, R 为震中距, σ 为均方差
石玉成等 ^[72]	2005 甘肃黄土地区	长轴方向: $\ln A=9.7041+0.5403M-2.1982\ln[R+20],\sigma=0.62$ 长轴方向: $\ln A=5.8320+0.5412M-1.6038\ln[R+5],\sigma=0.71$	基岩, 转换方法; A 为峰值加速度, M 为震级, R 为震中距, σ 为均方差
俞言祥等 ^[53]	2006 中国东部和西部地区	中国东部: 长轴: $\lg A=2.027+0.548M-1.902\lg[R+1.700\exp(0.425M)],\sigma=0.240$ 短轴: $\lg A=1.035+0.519M-1.465\lg[R+0.381\exp(0.525M)],\sigma=0.240$ 中国西部: 长轴: $\lg A=2.206+0.532M-1.954\lg[R+2.018\exp(0.406M)],\sigma=0.240$ 短轴: $\lg A=1.010+0.501M-1.441\lg[R+0.340\exp(0.521M)],\sigma=0.240$	A 为峰值加速度, M 为面波震级, R 为震中距; 以美国西部为参考地区, 通过转换的方法, 给出的是基岩峰值加速度
杨帆等 ^[83]	2011 黄土地区 (陕西、甘肃、青海、宁夏)	水平向: $\ln y=4.96+0.88M-1.40\lg[R+0.99\exp(0.45M)],\sigma^2=0.53$ 竖向: $\ln y=6.04+1.07M-1.90\lg[R+0.99\exp(0.52M)],\sigma^2=0.49$	y 为峰值加速度, M 为面波震级, R 为震中距; 利用汶川地震黄土地 1 221 条土层加速度记录统计得到
俞言祥等 ^[50]	2013 新疆区、 青藏区、 东部强震区、 中强地震区	青藏区 a_E 长轴 6.5 级以下: $\lg a_E=2.387+0.645M-2.416\lg[R+2.647\exp(0.366M)],\sigma=0.236$ 青藏区 a_E 长轴 6.5 级以上: $\lg a_E=3.807+0.411M-2.416\lg[R+2.647\exp(0.366M)],\sigma=0.236$ 青藏区 a_E 短轴 6.5 级以下: $\lg a_E=1.003+0.609M-1.854\lg[R+0.612\exp(0.457M)],\sigma=0.236$ 青藏区 a_E 短轴 6.5 级以上: $\lg a_E=2.457+0.388M-1.854\lg[R+0.612\exp(0.457M)],\sigma=0.236$ 青藏区 v_E 长轴 6.5 级以下: $\lg v_E=-0.064+0.766M-2.205\lg[R+2.647\exp(0.366M)],\sigma=0.271$ 青藏区 v_E 长轴 6.5 级以上: $\lg v_E=1.714+0.491M-2.205\lg[R+2.647\exp(0.366M)],\sigma=0.271$ 青藏区 v_E 短轴 6.5 级以下: $\lg v_E=-1.301+0.741M-1.696\lg[R+0.612\exp(0.457M)],\sigma=0.271$ 青藏区 v_E 长轴 6.5 级以上: $\lg v_E=0.443+0.474M-1.696\lg[R+0.612\exp(0.457M)],\sigma=0.271$	a_E 和 v_E 分别为有效峰值加速度和速度, M 为面波震级, R 为震中距, σ 为标准差; 参考美国西部地区, 以美国 NGA 强震数据库为基础, 采用转换方法, 以 6.5 级为分段界线给出了中国不同分区基岩地震动峰值衰减关系, 在国家标准 GB 18306—2015 中应用

4 黄土高原地区反应谱衰减关系研究进展

反应谱是反映地震动特性的重要参数,既是分析和研究地震动特性的有效手段,又是计算结构地震反应的重要工具。在工程抗震中,需要给出建设场地的设计地震动反应谱,地震动反应谱的衰减关系是预测场地地震动参数的重要工具。因此,反应谱衰减关系的研究在工程抗震领域备受重视。由于强震记录的缺乏,在我国针对黄土地区的反应衰减关系的研究进展相对比较缓慢,已有研究大多是针对黄土地区基岩的反应谱,且主要是利用美国西部的资料,通过转换的方法给出其衰减关系。在工

程应用中,利用等效震级、等效震中距、基岩反应谱、基岩地震动强度包络线参数等来人工合成场地基岩的地震动加速度时程。在此基础上,通过土层地震反应分析技术计算地表或指定层位的加速度时程;利用加速度时程给出不同阻尼比的反应谱,供抗震设计使用。

反应谱的衰减关系通常利用相同阻尼比反应谱的相同周期点谱值随震级和震中距的变化来描述,一系列周期点的衰减就构成了反应谱的衰减关系。1988 年,丁伯阳等^[82]利用甘、陕、宁、晋四省区和青海、内蒙古、河南和四川部分地区的地震烈度资料,采用烈度距离法,对比美国西部资料,首次给出了针

对中国黄土地区的基岩加速度反应谱衰减关系。早在 1986 年,田启文等^[36]就已根据烈度资料估算了涉及黄土的我国华北地区基岩加速度反应谱衰减关系。在此之后的一些加速度反应谱衰减的研究工

作,虽未将黄土高原地区单独分区研究,但其研究成果也涉及到了黄土高原地区。本文收集和整理了有关黄土高原地区反应谱衰减关系的研究成果列于表5。从表中可见,我国黄土高原地区绝大部分加

表 5 涉及黄土高原地区的加速度反应谱衰减关系研究成果列表

研究者 and 文献	时间和研究区域	简要说明
田启文等 ^[36]	1986 华北地区。基岩。 阻尼比为 0.05	以美国西部为参考地区,给出了与黄土地区有关的华北地区基岩加速度反应谱的衰减关系,采用的衰减模型为: $\ln y=a+bM-c\ln R-dR$ 式中: y 为不同周期点反应谱值; M 为震级; $R=\sqrt{\Delta^2+h^2}$; Δ 为断层距或震中距; h 是与震源深度有关的参数; a,b,c 和 d 均为回归常数。给出了反应谱 0.05~4.0 s,共 19 个周期点和峰值加速度的衰减关系和残差值
丁伯阳等 ^[82]	1988 中国黄土地区。 基岩。阻尼比为 0.05	采用烈度距离法并对比美国西部的资料,给出了中国黄土地区基岩的加速度反应谱衰减关系。使用的衰减模型同上。绘出了周期从 0.05~4.0 s,共 19 个周期点和峰值加速度的衰减关系
阮爱国等 ^[65]	1989 中国西北黄土地区。 基岩。阻尼比为 0.05	以美国西部为参考地区,通过转换方法给出了中国西北黄土地区 4 个分区的基岩加速度反应谱衰减关系。4 个区分别是甘肃西部及青海东部、陇西盆地、陕北高原及陇东地区和汾渭地震带。采用衰减模型为: $\ln y=a+bM-c\ln \sqrt{R^2+6^2}-d\sqrt{R^2+6^2}$ 式中: R 为震中距;其他同上。给出了周期为 0.05~4.0 s,19 个周期点和加速度峰值的衰减关系
霍俊荣 ^[14]	1989 华北,西南,西北,华南 地区。基岩和土层。 阻尼比为 0.05	以美国西部为参考地区,通过转换方法,给出了中国华北,西北,华南和西南地区的基岩和土层加速度反应谱的衰减关系,并给出了峰值加速度、峰值速度和峰值位移的衰减关系,反应谱的周期从 0.04~8.0 s,共给出 30 个周期点沿长轴和短轴方向衰减关系及标准差。 采用的椭圆衰减模型为: $\lg y=C_1+C_2M+C_4\lg[R+C_5\exp(C_6M)]$ 式中: y 为不同周期点的加速度反应谱值; M 为面波震级; R 为震中距; C_1,C_2,C_4,C_5,C_6 均为回归常数。华北和西北涉及黄土地区
俞言祥 ^[16]	2002 中国东部和 西部两个地区。 基岩	利用美国的西部资料,以 105°为分界线,通过转换方法给出了中国东部和西部基岩加速度反应谱衰减关系;反应谱周期从 0.04~20 s;列出了从 0.04 s 到 6 s 共 30 个周期点的衰减关系。采用的衰减模型为: $\lg S_a=C_1+C_2M+C_4\lg[R+C_5\exp(C_6M)]$ 式中: S_a 为不同周期点的加速度反应谱值;其他同上
俞言祥等 ^[71]	2004 青藏高原、东北地区, 即甘肃、宁夏和青海 地区。基岩	以美国西部为参考地区,通过转换的方法给出了甘肃、宁夏、青海地区的基岩加速度反应谱衰减关系。衰减关系模型如下: $\lg S_a=C_1+C_2M+C_3M^2+C_4\lg[R+C_5\exp(C_6M)]$ 式中各符号含义同上。给出了周期从 0.04~6.0 s 共 30 个周期点和峰值加速度的衰减关系
俞言祥等 ^[53]	2006 中国东部和西部。 基岩	以美国西部为参考地区,通过转换的方法给出了中国以 105°为分界的东部和西部地区的基岩加速度反应谱和峰值的衰减关系,采用的衰减模型为: $\lg S_a=C_1+C_2M+C_4\lg[R+C_5\exp(C_6M)]$ 式中的符号含义同上。给出了周期从 0.04~6.0 s 共 30 个周期点的基岩长轴方向和短轴方向的衰减关系及标准差
肖亮 ^[18]	2011 新疆区 川藏区 华北区 中强地震区。 基岩	以美国西部为参考地区,用转换方法,以 6.5 级为界,分震级给出了中国新疆区、川藏区、华北区和中强地震区地区的基岩加速度反应谱衰减关系。衰减模型为: 当 $M<6.5$ 时, $\lg y(M,R)=A_1(T)+B_1(T)-C(T)\lg[R+D\exp(E.M)]$ 当 $M\geq 6.5$ 时, $\lg y(M,R)=A_2(T)+B_2(T)-C(T)\lg[R+D\exp(E.M)]$ 式中: y 为与 T 对应的反应谱值; M 为面波震级; R 为震中距; A_1,A_2,B_1,B_2,C,D,E 均为回归系数。给出了上述地区周期以 0.01~6.0 s 共 27 个周期点和峰值点的反应谱衰减关系及标准差
中国地震局 地震防御司 ^①	2019 青藏区 新疆区 东部地震活跃区 中强地震区。基岩	将中国划分为青藏区、新疆区、东部地震活跃区和中强地震区 4 个分区。分区给出了基岩加速度反应谱和峰值加速度的衰减关系。 其他同上

速度反应谱衰减关系是以美国西部为参考地区,通过转换方法给出,其合理性需要通过丰富的强震记录加以检验。利用强震观测资料给出黄土高原地区

的加速度反应谱的衰减关系是工程地震学今后的一个重要研究课题,对黄土地区的工程建设有重要意义。

① 中国地震局震害防御司.关于印发《区域性地震安全性评价工作大纲(试行)》的通知;中震防函[2019]21 号.2019;14-24.

5 关于黄土高原地区地震动衰减问题的研究建议

从上述总结和评述可以看出,对黄土地区地震烈度的衰减关系研究得较多,并取得了比较丰富的成果。这些研究成果主要是针对不同的黄土区域给出了地震烈度的衰减关系。这些成果基本能够满足工程抗震中对烈度指标的需求,但针对我国整个黄土覆盖区域地震烈度衰减关系研究不够。在地震动峰值参数及反应谱衰减关系研究方面,由于强震观测资料的缺乏,大量的研究工作是以美国西部地区为参考地区,利用我国较为丰富的地震烈度资料,通过胡聿贤等提出的转换方法而给出其地震动峰值参数和反应谱的衰减关系,这些研究工作大多只给出黄土及相关地区基岩场地的地震动峰值参数和加速度反应谱的衰减关系,而针对黄土高原地区土层场地的地震动物理参数衰减关系研究几乎为空白。针对这一研究现状,本文对黄土高原地区地震动衰减关系的研究提出如下建议:

(1) 加强黄土地区强震观测台网的建设和强震观测资料的积累。

建立地震动物理参数的衰减关系强烈地依赖于强震观测资料的积累,为深入研究黄土地区地震动的衰减关系,建议在黄土地震多发区有针对性地布置能够覆盖黄土地区的强震观测台网,并建立黄土地区强震观测数据库,为开展黄土地区地震动研究奠定数据基础。

(2) 收集和整理黄土地区地震烈度资料,补充已有烈度资料必要的场地信息。

新中国成立后,我国地震工作者收集和整理了大量历史地震资料,在编制历代地震区划图时,也整理了大量地震烈度资料,特别是在编制第二代区划图时系统地整理了我国大量的历史地震资料^[84]。但这些资料大多缺少场地信息,建议收集和整理黄土地区地震烈度资料,必要时补充有关的场地信息,并建立黄土地区地震烈度数据库,这对研究不同场地的烈度衰减关系有重要意义。

(3) 研究适合于黄土高原地区的地震动物理参数的衰减模型。

目前,地震动物理参数的衰减模型较多,不同的研究者从不同的角度给出了不同的衰减模型。由于黄土是一种特殊土,有其独特的形成过程和环境,因此,建议在实际检验的基础上研究何种模型更适合于黄土高原地区,并给出误差可接受的针对黄土地

震动物理参数的衰减模型。

(4) 建立针对黄土高原地区地震烈度衰减模型和衰减关系。

在选择适合于黄土高原地区地震烈度衰减模型的基础上,利用黄土高原地区较为丰富的地震烈度资料,经过统计回归分析建立黄土地区(场地)地震烈度的衰减关系。在保证统计资料的数量和质量的前提下,最好根据黄土高原地区的地质构造特点和工程地质特征,分区建立地震烈度的衰减关系。对所建立的地震烈度衰减关系应该用已有的烈度资料进行检验,以验证其衰减关系的合理性。

(5) 尝试针对黄土高原地区建立地震动峰值参数和加速度反应谱的衰减关系。

近十几年来,我国在黄土高原地区积累了一定数量的强震记录,尽管数量还不够充足,但可以尝试建立黄土高原地区中强地震的地震动峰值参数和加速度反应谱的衰减关系。建议同时建立基岩和土层的地震动衰减关系,比较以美国西部为参考地区利用转换方法获得的基岩衰减关系的差别,并借助于土层地震反应分析的方法验证衰减模型和衰减关系的合理性。这一工作对黄土高原地区的工程建设有重要的应用价值。

(6) 建立黄土高原地区地震动持续时间的衰减关系。

地震动持续时间是指地震动加速度时程中振动相对强烈段的持续时间(通常简称持时)。地震动持时在结构抗震时程分析中有重要作用,利用地震动持时的衰减关系可以预测建设场地不同地震的持续时间。利用黄土高原地区现有的强震记录可探索建立适合于黄土高原地区的中强地震持时的衰减关系。

(7) 开展黄土高原地区地震动强度包络线控制参数衰减关系研究。

地震动强度包络线衰减是指地震动强度包络线随震级、距离变化的统计经验关系。不同包络线模型的控制参数不同,我国工程界常采用三段式(上升段、平稳段和下降段)的包络函数模型^[85]。这一模型的控制参数为强震平稳段的起始时刻 t_1 、结束时刻 t_2 和控制下降段快慢的指数 C 。建议开展黄土高原地区 t_1 、 t_2 和 C 等参数的研究,分别建立 t_1 、 t_2 和 C 与地震震级和距离 R 的关系。黄土高原地区地震动强度包络线控制参数衰减关系研究成果可用于黄土地区人造地震动的生成。

(8) 研究黄土高原地区场地条件对地震动衰减

的影响。

我国学者在黄土地场地条件对地震动影响方面开展了大量研究工作。石玉成等^[86]研究了黄土覆盖层厚度和地形条件对地震动放大效应的影响;陈拓等^[87]研究了黄土地区场地条件对地震动放大效应的影响;姚凯等^[88]、刘薇等^[89]、万秀红等^[90]分别从不同角度研究了黄土覆盖层厚度对地震动的影响;马林伟等^[91]、夏坤等^[92]分别研究了丘陵河谷地貌和黄土塬的地震动响应特征;吴志坚等^[93]、夏坤等^[94-95]还研究了汶川特大地震对远震区黄土地场地震动的影响。本文建议将上述研究成果应用到地震衰减关系研究中,充分考虑黄土高原地区覆盖层厚度、地形地貌等对地震动衰减的影响,建立考虑场地条件的黄土高原地区地震动衰减关系。

6 结 语

由于气候条件和历史的原因,黄土高原地区的工程建设和经济发展相对滞后。随着我国经济建设的高速发展,黄土高原地区的工程建设和经济发展将步入新的快速发展阶段,城镇化和大规模的基础设施建设也将对黄土高原地区的工程抗震提出更加迫切的需求。长期以来,地震灾害和地质灾害是制约黄土高原地区工程建设和经济发展的重要因素,黄土的抗震问题一直是工程抗震研究领域的重点课题。地震烈度衰减关系问题、地震动峰值参数及加速度反应谱衰减关系问题是工程抗震研究的基础。我国地震烈度资料相对比较丰富,基本具备研究黄土高原地区地震烈度衰减关系的基础。强震资料的不足一直是制约我国地震动峰值参数和加速度反应谱衰减关系研究的瓶颈问题,但我国强震观测台网建设在不断发展,汶川特大地震后及近年来发生的地震已在黄土地区获取了一定数量的强震记录,可探索利用这些资料建立黄土高原地区地震动衰减关系。探索研究黄土高原地区地震烈度、地震动峰值参数及反应谱的衰减关系,对促进黄土地区工程抗震研究及工程建设具有重要的理论和实际意义。针对特殊土开展地震动衰减关系研究也具有重要的科学意义。

参考文献(References)

[1] 彭建兵,王启耀,门玉明.黄土高原滑坡灾害[M].北京:科学出版社,2019:1.
PENG Jianbing,WANG Qiyao,MEN Yuming.Landslide disaster in Loess Plateau[M].Beijing:Science Press,2019:1.
[2] 薄景山.地震工程学辞典[M].北京:地震出版社,2021:97.

BO Jingshan.A dictionary of earthquake engineering[M].Beijing:Seismological Press,2021:97.
[3] 刘恢先.关于地震烈度及其工程应用问题[J].地球物理学报,1978,21(4):340-351.
LIU Huixian.On the concept and application of earthquake intensity[J].Chinese Journal of Sinica,1978,21(4):340-351.
[4] 谢礼立,张敏政,夏敬谦.中国防震减灾百科全书:地震工程学[M].北京:地震出版社,2014:12.
XIE Lili,ZHANG Minzheng,XIA Jingqian.Encyclopedia of earthquake prevention and disaster reduction in China:earthquake engineering[M].Beijing:Seismological Press,2014:12.
[5] 陈运泰.地震浅说[M].北京:地震出版社,2019:96.
CHEN Yuntai.A concise introduction of earthquakes[M].Beijing:Seismological Press,2019:96.
[6] SUYEHIRO K.Engineering seismology notes on American lectures[J].Proc Am Soc Civil Engs,1934,58(40):1934.
[7] RICHTER C F.An instrumental earthquake magnitude scale [J].Bulletin of the Seismological Society of America,1935,25(1):1-32.
[8] GUTENBERG B.Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes[J].Bulletin of the Seismological Society of America,1945,35(1):3-12.
[9] GUTENBERG B, RICHTER C F. Magnitude and energy of earthquakes[J].Annals of Geophysics,1956,9(1):1-15.
[10] HOUSNER G W. Characteristics of strong-motion earthquakes[J].Bulletin of the Seismological Society of America,1947,37(1):19-31.
[11] GUTENBERG B, RICHTER C F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration[J].Bulletin of the Seismological Society of America,1942,32(1):163-191
[12] GUTENBERG B, RICHTER C F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (second paper) [J].Bulletin of the Seismological Society of America,1956,46(1):105-145.
[13] 刘恢先.地震工程研究报告集-第二集[M].北京:科学出版社,1965:53-84.
LIU Huixian.Earthquake engineering research report set-the second set[M].Beijing:Science Press,1965:53-84.
[14] 霍俊荣.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,1989:14-26.
HUO Junrong.Study on attenuation law of near-field ground motion[D].Harbin:Institute of Engineering Mechanics,China Earthquake Administration,1989:14-26.
[15] 王国新.强地震动衰减研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2001:4-22.
WANG Guoxin.Study on attenuation of strong ground motion [D].Harbin:Institute of Engineering Mechanics,China Earthquake Administration,2001:4-22.
[16] 俞言祥.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,2002:5-14.
YU Yanxiang. Research on the attenuation relationship of long period ground motion[D].Beijing:Institute of Geophys-

- ics, China Earthquake Administration, 2002: 5-14.
- [17] 王海江. 中小地震地震动衰减关系的研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2002: 1-19.
- WANG Haijiang. Study on attenuation relationship of ground motion in moderate and small earthquakes[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2002: 1-19.
- [18] 肖亮. 水平向基岩强地面运动参数衰减关系研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2011: 5-18.
- XIAO Liang. Study on the attenuation relationship of horizontal bedrock strong ground motion parameters[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2011: 5-18.
- [19] 肖亮, 俞言祥. 我国大陆地区常用浅壳地震的地震动参数衰减关系[J]. 地震学报, 2022, 44(5): 752-764.
- XIAO Liang, YU Yanxiang. Attenuation relationship of ground motion parameters of shallow shell earthquakes commonly used in Mainland China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44(5): 752-764.
- [20] 卢建旗. 中强地震活动区地震动衰减规律研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2009: 3-7.
- LU Jianqi. Study on attenuation law of ground motion in moderate and strong seismic activity area[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2009: 3-7.
- [21] 万卫. 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, 2013: 5-17.
- WAN Wei. Study on attenuation relationship of Wenchuan earthquake response spectrum[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013: 5-17.
- [22] 陶正如, 陶夏新, 纪林建. 16WCEE 地震动研究相关论文综述[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(3): 27-37.
- TAO Zhengru, TAO Xiaxin, JI Linjian. Summary of the 16WCEE papers on ground motion study[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(3): 27-37.
- [23] 刘平, 徐政伟, 罗奇峰. 我国大陆地区地震动衰减关系研究进展[J]. 地震学报, 2022, 44(5): 797-809.
- LIU Ping, XU Zhengwei, LUO Qifeng. Advances in ground motion attenuation relationship of Chinese Mainland[J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44(5): 797-809.
- [24] ABRAHAMSON N, SILVA W. Summary of the abrahamson & silva NGA ground-motion relations[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 67-97.
- [25] BOORE D M, ATKINSON G M. 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]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 99-138.
- [26] CAMPBELL K W, BOZORGNI A Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 139-171.
- [27] CHIOU B J, YOUNGS R R. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 173-215.
- [28] IDRIS I M. An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 217-242.
- [29] TRIFUNAC M D, BRADY A G. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(1): 139-162.
- [30] MCGUIRE R K. The use of seismic intensity data in seismic hazard analysis[C]//Proceedings of 6th World Conference on Earthquake Engineering. Meerut, India: Sarita Prakashan, 1977: 709-714.
- [31] MCGUIRE R K. Ground motion estimation in regions with few data[C]//Proceedings of 8th World Conference on Earthquake Engineering. San Francisco, USA, 1984: 327-334.
- [32] CAMPBELL K W. A ground motion model for the Central United States based on near-source acceleration data[C]//Proc Earq and Earthq. Knoxville, Tennessee, US, 1981: 213-232.
- [33] HASEGAWA H, BASHAM P, BERRY M J. Attenuation relations for strong seismic ground motion in Canada[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71(5): 1943-1962.
- [34] 胡聿贤, 张敏政. 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, 1984, 4(1): 1-11.
- HU Yuxian, ZHANG Minzheng. A method of predicting, ground motion parameters for regions with poor ground motion data[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984, 4(1): 1-11.
- [35] 胡聿贤, 周克森, 阎秀杰. 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, 1996, 16(3): 1-10.
- HU Yuxian, ZHOU Kesen, YAN Xiujie. A method for evaluation of ground motion in regions with few acceleration observation data[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(3): 1-10.
- [36] 田启文, 廖振鹏, 孙平善. 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, 1986, 6(1): 21-36.
- TIAN Qiwen, LIAO Zhenpeng, SUN Pingshan. Estimation of ground motion attenuation in China based on intensity data[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1986, 6(1): 21-36.
- [37] 霍俊荣, 胡聿贤, 冯启民. 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, 1992, 12(3): 1-15.
- HUO Junrong, HU Yuxian, FENG Qimin. Study on estimation of ground motion from seismic intensity[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1992, 12(3): 1-15.
- [38] KANAI K. An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions[J]. Bull Earge Res Inst, 1961, 39(1): 85-89.

- [39] JOYNER W B, BOORE D, PORCELLA R. 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, 1981, 71(1): 3-15.
- [40] 王国新, 陶夏新. 地震动衰减关系拟合的新两步法[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(1): 24-28.
WANG Guoxin, TAO Xiaxin. A new two-steps method for fitting ground motion attenuation relationship[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 24-28.
- [41] 肖亮, 俞言祥. 一种新的拟合地震动衰减关系的分步回归法[J]. 地震学报, 2010, 32(6): 725-732, 767.
XIAO Liang, YU Yanxiang. A new step-regression approach for fitting ground motion data with attenuation relation[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(6): 725-732, 767.
- [42] FUKUSHIMA Y, TANAKA T. A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan[J]. 1990, 80(4): 757-783.
- [43] 杨伟松, 王长理, 许卫晓, 等. 南北地震带地区地震烈度衰减关系研究[J]. 世界地震工程, 2021, 37(1): 207-218.
YANG Weisong, WANG Changli, XU Weixiao, et al. Study on the relationship of seismic intensity attenuation in the North-South seismic zone[J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(1): 207-218.
- [44] MILNE W G, DAVENPORT A G. Distribution of earthquake risk in Canada[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1969, 59(2): 729-754.
- [45] ESTEVA L. Seismic risk and seismic design decisions[M]// SMITH R J, editor. Seismic design for nuclear power plants. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 197: 142-182.
- [46] DUKE C M. Effects of site classification and distance on instrumental induces in San Fernando earthquake[R]. Los Angeles, California: Univ of Cali, School of Engg and Applied Science, 1972.
- [47] HOWELL B F, SCHULTZ T R. Attenuation of modified Mercalli intensity with distance from the epicenter[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(3): 651-665.
- [48] 陈达生, 刘汉兴. 地震烈度椭圆衰减关系[J]. 华北地震科学, 1989, 7(3): 31-42.
CHEN Dasheng, LIU Hanxing. Elliptical attenuation relationship of earthquake intensity[J]. North China Earthquake Sciences, 1989, 7(3): 31-42.
- [49] 国家地震局. 中国地震烈度区划图[M]. 北京: 地震出版社, 1991.
State Seismological Bureau. Seismic intensity zoning map of China[M]. Beijing: Seismological Press, 1991.
- [50] 俞言祥, 李山有, 肖亮. 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, 2013, 8(1): 24-33.
YU Yanxiang, LI Shanyou, XIAO Liang. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2013, 8(1): 24-33.
- [51] CHANDRA U. Attenuation of intensities in the United States[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1979, 69(6): 2003-2024.
- [52] 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 等. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震, 2000, 16(2): 99-106.
WANG Suyun, YU Yanxiang, GAO Ajia, et al. Development of attenuation relations for ground motion in China[J]. Earthquake Research in China, 2000, 16(2): 99-106.
- [53] 俞言祥, 汪素云. 中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系[J]. 震灾防御技术, 2006, 1(3): 206-217.
YU Yanxiang, WANG Suyun. Attenuation relations for horizontal peak ground acceleration and response spectrum in eastern and western China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(3): 206-217.
- [54] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 中国地震烈度表: GB/T 17742—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020..
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. The Chinese seismic intensity scale: GB/T 17742—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [55] 孙平善, 廖振鹏. 平原和山区地震烈度衰减规律的比较[J]. 地震工程与工程振动, 1990, 10(1): 35-40.
SUN Pingshan, LIAO Zhenpeng. A comparison between attenuations of the seismic intensity in plain and mountainous area[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1990, 10(1): 35-40.
- [56] 霍俊荣, 胡丰贤. 地震动峰值参数衰减规律的研究[J]. 地震工程与工程振动, 1992, 12(2): 1-11.
HUO Junrong, HU Yuxian. Study on attenuation laws of ground motion parameters[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1992, 12(2): 1-11.
- [57] 郁曙君. 中国东部平原和西北部地区烈度衰减关系的研究[J]. 地震学报, 1995, 17(2): 203-211.
YU Shujun. Study on the relationship between intensity attenuation in the eastern plain and northwest of China[J]. Acta Seismologica Sinica, 1995, 17(2): 203-211.
- [58] 苗庆杰, 许萍. 山东及邻近区地震烈度衰减关系探讨[J]. 西北地震学报, 2008, 30(3): 282-287.
MIAO Qingjie, XU Ping. Study on the formula of seismic intensity attenuation in Shandong and its adjacent areas[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(3): 282-287.
- [59] 田家勇, 兰晓雯, 谢周敏, 等. 地形对地震烈度衰减的影响[J]. 震灾防御技术, 2010, 5(3): 281-287.
TIAN Jiayong, LAN Xiaowen, XIE Zhoumin, et al. Influence of topography on seismic intensity attenuation[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2010, 5(3): 281-287.
- [60] 翁文灏. 民国九年十二月十六日甘肃的地震[J]. 科学, 1922, 7(2): 105-114.
WENG Wenhao. On the Gansu earthquake of Dec. 16, 1920[J]. Science, 1922, 7(2): 105-114.
- [61] 国家地震局. 中国地震烈度区划工作报告[M]. 北京: 地震出版

- 社,1981:346-347.
- State Seismological Bureau. Work report on seismic intensity zoning in China[M]. Beijing: Seismological Press, 1981: 346-347.
- [62] 中国地震烈度区划图编委会. 中国地震烈度区划图(1990)及其说明[J]. 中国地震, 1992, 8(4): 1-11.
- China Earthquake Intensity Zoning Map Compilation Committee. Seismic intensity zoning map of China (1990) and its explanation[J]. Earthquake Research in China, 1992, 8(4): 1-11.
- [63] 胡聿贤. GB 18306—2001《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 52-55.
- HU Yuxian. The textbook GB 18306—2001 “Zoning map of ground motion parameters in China” was publicized[M]. Beijing: Standards Press of China, 2001: 52-55.
- [64] 高孟潭. GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 169-179.
- GAO Mengtan. The textbook GB 18306—2015 “Zoning map of ground motion parameters in China” was publicized[M]. Beijing: Standards Press of China, 2015: 169-179.
- [65] 阮爱国, 孙崇绍. 中国西北黄土地区地震动衰减规律研究[J]. 西北地震学报, 1989, 11(4): 25-36.
- RUAN Aiguo, SUN Chongshao. A study on attenuation law of seismic ground motion in the loess region of the Northwest China[J]. Northwestern Seismological Journal, 1989, 11(4): 25-36.
- [66] 温春生. 山西地震动衰减关系的分析与确定[J]. 华北地震科学, 1991, 9(1): 74-81.
- WEN Chunsheng. Analysis and determination of the equation of ground motion attenuation in Shanxi [J]. North China Earthquake Sciences, 1991, 9(1): 74-81.
- [67] 丁伯阳, 田少柏, 雷中生. 由中国黄土地区地震动衰减关系对地震动法的一点探讨[J]. 华北地震科学, 1991, 9(4): 24-31.
- DING Boyang, TIAN Shaobo, LEI Zhongsheng. A discussion on ground motion method with the attenuation relationship of grqund motion in loess region of China [J]. North China Earthquake Sciences, 1991, 9(4): 24-31.
- [68] 林金瑛, 蔡华昌, 赵军. 河北及邻近地区地震动衰减关系的分析与确定[J]. 华北地震科学, 1993, 11(3): 19-29.
- LIN Jinying, CAI Huachang, ZHAO Jun. Analysis and determination of the equation of ground motion attenuation in Hebei Province and its nearby areas[J]. North China Earthquake Sciences, 1993, 11(3): 19-29.
- [69] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003: 288-290.
- WANG Lanmin. Loess dynamics [M]. Beijing: Seismological Press, 2003: 288-290.
- [70] 沙海军, 吕悦军, 彭燕菊, 等. 地震烈度椭圆衰减的限定模型及其在华北地区的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(1): 28-36.
- SHA Haijun, LÜ Yuejun, PENG Yanju, et al. A constrained model of elliptical attenuation of earthquake intensity and its application in North China[J]. Journal of Seismology, 2004, 24(1): 28-36.
- [71] 俞言祥, 汪素云. 青藏高原东北地区水平向基岩加速度峰值与反应谱衰减关系[J]. 地震学报, 2004, 26(6): 591-600.
- YU Yanxiang, WANG Suyun. Attenuation relations for horizontal peak ground acceleration and response spectrum in northeastern Tibetan Plateau region [J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(6): 591-600.
- [72] 石玉成, 卢霄霞. 甘肃黄土地区地震动持续时间预测研究[J]. 甘肃科学学报, 2005, 17(3): 35-39.
- SHI Yucheng, LU Yuxia. Prediction of seismic duration in loess land of Gansu Province [J]. Journal of Gansu Sciences, 2005, 17(3): 35-39.
- [73] 周中红, 何少林, 陈文凯. 甘肃省地震烈度衰减关系研究[J]. 西北地震学报, 2010, 32(1): 72-75.
- ZHOU Zhonghong, HE Shaolin, CHEN Wenkai. Study on the attenuation relationship of seismic intensity in Gansu Province [J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(1): 72-75.
- [74] 崔鑫, 苗庆杰, 王金萍. 华北地区地震烈度衰减模型的建立[J]. 华北地震科学, 2010, 28(2): 18-21.
- CUI Xin, MIAO Qingjie, WANG Jinping. Model of the seismic intensity attenuation for North China [J]. North China Earthquake Sciences, 2010, 28(2): 18-21.
- [75] 范文, 杜文和, 王晓军, 等. 陕西地区地震动衰减关系研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(2): 47-54.
- FAN Wen, DU Wenhe, WANG Xiaojun, et al. Seismic motion attenuation relations in Shaanxi areas [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(2): 47-54.
- [76] 肖亮, 俞言祥. 中国西部地区地震烈度衰减关系[J]. 震灾防御技术, 2011, 6(4): 358-371.
- XIAO Liang, YU Yanxiang. Earthquake intensity attenuation relationship in western China [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2011, 6(4): 358-371.
- [77] 高娜, 贾军鹏, 魏艳旭, 等. 地震灾害评估软件烈度衰减系数研究[J]. 华北地震科学, 2012, 30(1): 6-11.
- GAO Na, JIA Junpeng, WEI Yanxu, et al. Study on the intensity attenuation coefficient of seismic disaster assessment software [J]. North China Earthquake Sciences, 2012, 30(1): 6-11.
- [78] 杨彦明, 戴勇, 张国清, 等. 内蒙古中西部地区地震烈度衰减关系[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(1): 30-37.
- YANG Yanming, DAI Yong, ZHANG Guoqing, et al. Attenuation relation of seismic intensity in the middle and western regions of Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2016, 37(1): 30-37.
- [79] 谷国梁, 邱虎, 王晓蕾, 等. 天津市及邻区地震烈度衰减关系研究[J]. 震灾防御技术, 2016, 11(1): 35-43.
- GU Guoliang, QIU Hu, WANG Xiaolei, et al. Attenuation relationship of seismic intensity in Tianjin City and its adjacent areas [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2016, 11(1): 35-43.

- [80] 杨凡.河北及邻区地震烈度衰减关系研究[J].地震地磁观测与研究,2017,38(2):98-103.
- YANG Fan. Study on seismic intensity attenuation relationship in Hebei and adjacent areas[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2017, 38(2): 98-103.
- [81] 廖振鹏.地震小区划:理论与实践[M].北京:地震出版社,1989:141-153.
- LIAO Zhenpeng. Seismic microzoning: theory and practice [M]. Beijing: Seismological Press, 1989: 141-153.
- [82] 丁伯阳,雷中生,方淑兰.中国黄土地区基岩地震动经验衰减关系[J].西北地震学报,1988,10(3):57-65.
- DING Boyang, LEI Zhongsheng, FANG Shulan. Experimental attenuation relationship of ground motion on basement rock in Chinese loess region[J]. Northwestern Seismological Journal, 1988, 10(3): 57-65.
- [83] 杨帆,罗奇峰,李炳乾,等.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,2011,37(10):1487-1492.
- YANG Fan, LUO Qifeng, LI Bingqian, et al. Acceleration peak attenuation relationship of loess region in northwestern China on the basis of Wenchuan earthquake[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(10): 1487-1492.
- [84] 国家地震局全国地震烈度区划编图组.中国地震等烈度线图集[M].北京:地震出版社,1979.
- National Seismic Intensity Zoning Map Compilation Group of State Seismological Bureau. China earthquake intensity line atlas [M]. Beijing: Seismological Press, 1979.
- [85] 霍俊荣,胡聿贤,冯启民.地面运动时程强度包络函数的研究[J].地震工程与工程振动,1991,11(1):1-12.
- HUO Junrong, HU Yuxian, FENG Qimin. Study on envelope function of acceleration time history [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 11(1): 1-12.
- [86] 石玉成,王兰民,张颖.黄土场地覆盖层厚度和地形条件对地震动放大效应的影响[J].西北地震学报,1999,21(2):203-208.
- SHI Yucheng, WANG Lanmin, ZHANG Ying. Effects of overburden thickness and topography of loessial sites on earthquake ground motion [J]. Northwestern Seismological Journal, 1999, 21(2): 203-208.
- [87] 陈拓,吴志坚,马巍,等.黄土地区场地条件对地震动放大效应影响研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(5):969-974.
- CHEN Tuo, WU Zhijian, MA Wei, et al. Study on the effects of site conditions on earthquake ground motion in loess sites [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(5): 969-974.
- [88] 姚凯,王兰民,张志坚.黄土覆盖山地对岷县、漳县 $M_s6.6$ 地震余震动力响应的影响[J].地震工程学报,2013,35(4):768-773.
- YAO Kai, WANG Lanmin, ZHANG Zhijian. Influence of aftershocks of the Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ earthquake in a loess-rich, hilly region [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 768-773.
- [89] 刘薇,刘彬,张晓清.西宁地区黄土土层厚度对场地地震动参数的影响[J].地震研究,2014,37(增刊1):104-108.
- LIU Wei, LIU Bin, ZHANG Xiaoqing. Influence of loess soil thickness on site ground motion parameter in Xining region [J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37 (Suppl01): 104-108.
- [90] 万秀红,石玉成,卢育霞,等.不同类别黄土场地覆盖层厚度对地表加速度反应谱的影响研究[J].高原地震,2016,28(2):34-41.
- WAN Xiuhong, SHI Yucheng, LU Yuxia, et al. Study on the influence of the ground cover layer thickness of different categories loess site on the ground surface acceleration response spectrum [J]. Plateau Earthquake Research, 2016, 28(2): 34-41.
- [91] 马林伟,卢育霞,王良,等.黄土丘陵河谷场地地震动特征研究[J].地震工程学报,2016,38(3):373-381,390.
- MA Linwei, LU Yuxia, WANG Liang, et al. Study on ground motion characteristics in loess hill valley sites [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(3): 373-381, 390.
- [92] 夏坤,董林,蒲小武,等.黄土源地震动响应特征分析[J].岩土力学,2020,41(1):295-304.
- XIA Kun, DONG Lin, PU Xiaowu, et al. Earthquake response characteristics of loess tableland [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 295-304.
- [93] 吴志坚,王兰民,陈拓,等.汶川地震远场黄土场地地震动场地放大效应机制研究[J].岩土力学,2012,33(12):3736-3740.
- WU Zhijian, WANG Lanmin, CHEN Tuo, et al. Study of mechanism of site amplification effects on ground motion in far field loess during Wenchuan $M_s8.0$ earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3736-3740.
- [94] 夏坤,张令心,董林.汶川地震远震区黄土场地地震反应特征分析[J].地震工程学报,2018,40(3):504-511.
- XIA Kun, ZHANG Lingxin, DONG Lin. Earthquake response analysis for loess sites in far-field of Wenchuan earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 504-511.
- [95] 夏坤,王蕾,李方圆,等.汶川地震黄土地区地震动特征分析[J].世界地震工程,2020,36(4):193-199.
- XIA Kun, WANG Lei, LI Fangyuan, et al. Strong ground motion characteristics of loess area in Wenchuan earthquake [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(4): 193-199.

(本文编辑:张向红)