

DOI:10.11918/202503076

基于地震动谱反演的我国场地效应经验模型

温瑞智^{1,2}, 李 辉^{1,2}, 王宏伟^{1,2}, 任叶飞^{1,2}, 刘 也^{1,2}

(1. 地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所), 哈尔滨 150080;

2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘 要: 为探讨场地效应的区域差异特征, 同时给出经验性场地效应经验模型, 本文利用我国强震动观测台网在 2007~2020 年间收集的强震动观测记录, 基于地震动广义谱反演方法, 给出了南天山西部、龙门山断裂带、云南地区的 211 个强震动观测台站的场地效应, 分别建立了场地类别、地表以下 30 m 深度内的平均剪切波速(V_{s30})相关的场地效应经验模型, 并探讨了场地效应的区域相关以及场地分类指标(覆盖层厚度 H 和等效剪切波速 V_{se})与场地效应的相关性。研究表明: I、II、III 类场地的平均放大效应经验模型可以在整个频段上体现不同类别场地的场地效应的整体差异; 同类别场地的场地效应区域性差异十分明显, 尤其是南天山西部和云南地区 III 类场地表现出场地效应的显著差异; 我国规范的场地分类指标(H 和 V_{se})与场地效应的相关性并不明显, 且可能存在区域性的差异; 与 V_{s30} 相关的场地效应的经验模型整体上能够体现场地条件的影响。本文研究结果可为区域化地震动预测模型的构建、地震风险评估精度的提升提供依据, 可指导区域场地放大效应的应用, 并为探索更优场地分类指标、制定区域差异化场地分类标准提供技术支撑。

关键词: 地震动; 谱反演; 场地效应; 经验模型; 区域特性

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)06-0092-11

Empirical model of site effect in China derived from the spectral inversion of seismic ground motion

WEN Ruizhi^{1,2}, LI Hui^{1,2}, WANG Hongwei^{1,2}, REN Yefei^{1,2}, LIU Ye^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration), Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

Abstract: To investigate the regional variations in site effects and establish empirical site amplification models, a large number of seismic ground motion recordings collected by the National Strong-Motion Observation Network System of China from 2007 to 2020 were utilized to separate the site effects at 211 strong-motion stations mainly distributed in the western part of the Southern Tianshan, Longmenshan fault zone, and Yunnan based on the generalized spectral inversion method. The empirical models of site effects associated with either the site category or V_{s30} were established. Furthermore, the regional dependence of site effects was systematically investigated, along with the correlation between site amplification characteristics and the code-specified site classification indicators (overburden thickness H and equivalent shear-wave velocity V_{se}). The results demonstrate that the empirical amplification models for Site Classes I, II, and III effectively capture the systematic differences in site effects across the entire frequency spectrum. Significant regional variations in site amplification are observed within the same site classification category, with particularly pronounced differences between Class III sites in the western Southern Tianshan and Yunnan regions. The correlation between the site classification indicators (H and V_{se}) and actual site amplification characteristics is found to be statistically insignificant, with potential regional discrepancies noted in this relationship. Meanwhile, the V_{s30} -based empirical models reliably represent the influence of local site conditions on ground motion amplification. These results provide a scientific basis for developing regionalized ground motion prediction models, improving the accuracy of seismic risk assessments and guiding the practical application of regional site amplification effects. Furthermore, the results offer valuable support for exploring more effective site classification indicators and establishing regionally differentiated site classification standards.

Keywords: seismic ground motion; spectral inversion; site effect; empirical model; regional dependency

收稿日期: 2025-03-28; 录用日期: 2025-05-23; 网络首发日期: 2025-06-17

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250617.0948.002>

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3003601); 国家自然科学基金(U2239252, 52478567)

作者简介: 温瑞智(1968—), 男, 研究员, 博士生导师

通信作者: 王宏伟, whw1990413@163.com

场地效应对(近)地表观测的地震动具有重要的影响,体现了近地表地质条件和地球物理结构两个方面对地震动的影响^[1]。早期地震工程研究并未特别关注场地效应。1966 年谢礼立院士在邢台地震科学讨论会上提出“在不大的均匀场地上,地震动仍存在明显差异”的结论,这是国际上最早提出局部场地效应的研究成果。Borcherdt^[2]通过分析加州旧金山湾区的核爆记录,论证了近地表地质条件对地震动的影响。然而,Hudson^[3]则认为近地表地质条件与地震动无明显相关性。

1985 年墨西哥米却肯地震中,近地表软土覆盖层对长周期地震动的显著放大效应导致墨西哥城大量高层建筑严重破坏,这成为推动国际地震工程界关注场地效应的里程碑^[4]。后续的震害调查资料充分证实了场地效应明显加剧地震破坏,例如:1995 年日本阪神地震中出现的神户破坏带^[5]、2015 年尼泊尔廓尔喀地震中加德满都的显著破坏^[6]、2016 年意大利中部地震中部分城镇的严重震害^[7]。目前,评估场地效应主要通过理论方法或经验方法,但对于如何定量地确定场地效应尚未达成普遍的共识^[2]。理论方法是通过建立地震波在震源或者地震学基岩面至地表面的介质中传播的物理模型来实现的,利用 1D、2D、3D 模型均可以得到场地效应。1D 模型假设传播介质为横向均匀的水平成层模型,2D 或 3D 模型考虑了传播介质的横向不均匀特性,针对横向不均匀介质分别基于 1D、2D、3D 模型给出的场地效应存在很大差异^[8],基于 1D 模型评估的场地效应基本上是有效的^[1],目前 1D 场地效应已普遍应用,例如:GB17741—2005《工程场地地震安全性评价》^[9]、地震动预测方程^[10]等。然而,理论方法的评估结果仍存在较大的认知不确定性。

利用地震动观测记录给出频域上的场地放大系数是评估场地效应最主要的经验方法,包括标准谱比法^[2]、水平/垂直谱比法^[11]、谱反演方法^[12-13]等。标准谱比法需要参考场地,但由于地表岩石风化层的普遍存在,参考场地难以找到^[14],为此有研究利用井上/井下台站记录的标准谱比计算场地效应^[15]。水平/垂直谱比法无需参考场地,其假定垂直分量的地震动不受近地表地质条件影响,但实际上并不完全成立^[16]。谱反演方法可以给出地震体波的场地放大(或缩小)效应,该方法不仅适用于评估参考场地附近场地的场地效应,相较于标准谱比

法也具有一定优势。然而,其应用需满足在较小区域内布设足够数量的观测台站,并获取一定数量的地震动记录。Field 和 Jacob^[17]、Bonilla 等^[18]对比了不同方法的场地效应计算结果,基于水平/垂直谱比法的场地放大幅值与基于标准谱比和谱反演法的结果存在差异,但 3 种方法在体现场地效应的频率相关性方面有很好的 consistency。

我国数字强震动观测台网自 2007 年底运行以来,已获取了 1.2 万余组自由场三分量强震动观测记录,在一系列破坏性地震及其余震的强震动观测中发挥了重要作用,这些数据为评估场地效应提供了基础。前期已有多个研究在特定区域开展了相关工作,例如:龙门山地区^[19-21]、四川东南部^[22]、新疆南天山西部地区^[23]、云南西南部^[24]等。本研究利用全国范围内的强震动观测记录,在多个区域开展地震动谱反演分析,给出多个区域强震动台站的场地效应,以及场地类别、 V_{s30} 相关的场地效应经验模型,重点讨论了场地效应的区域性差异,以期对地震风险评估提供更具实用价值的参考。

1 两步非参数化广义谱反演方法

本文基于两步非参数化广义谱反演方法计算场地效应^[25]。观测记录水平向 S 波的傅里叶幅值谱表示为

$$O_{ij}(f_m, R_{ij}) = Ma_i(f_m) \cdot A_{ij}(f_m, R_{ij}) \tag{1}$$

式中: R_{ij} 为第 j 个台站到第 i 次地震的震源距, f_m 为第 m 个频率点的频率, $O_{ij}(f_m, R_{ij})$ 表示第 j 个台站在第 i 次地震中获取的观测记录水平向 S 波在频率点 f_m 的傅里叶幅值谱, $Ma_i(f_m)$ 是与第 i 次地震的震级大小相关的标量; $A_{ij}(f_m, R_{ij})$ 为频率 f_m 的路径衰减曲线,表示路径衰减随震源距的变化,可以反映 S 波传播过程中所有的衰减(如几何扩散、非弹性衰减、散射衰减、地震波折射/反射等)。

第一步,根据式(1)反演路径衰减项,为尽可能确保路径衰减为距离的平滑曲线,将频率 f_m 的傅里叶幅值谱根据记录震源距划分为等间距的 N_{Dm} 组,并以平均震源距 R_{mk} 表示第 k 组所有记录的震源距,式(1)中统一用 R_{mk} 替代 R_{ij} ,本文采用的等距离间隔为 5 km。第一步反演时,需要给定路径衰减的约束条件,即在参考距离(R_0 ,通常为相应频率可用记录的最小震源距)处无衰减且路径衰减曲线为随距离变化的平滑曲线。式(1)取对数后线性化,并增加路径衰减的约束条件,表示为如下广义矩阵的形式

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ \omega_1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -\omega_2/2 & \omega_2 & -\omega_2/2 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -\omega_2/2 & \omega_2 & -\omega_2/2 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \log A(f_m, R_{m1}) \\ \log A(f_m, R_{m2}) \\ \log A(f_m, R_{m3}) \\ \log A(f_m, R_{m4}) \\ \vdots \\ \log A(f_m, R_{mN_{Dm}}) \\ \log Ma_1(f_m) \\ \log Ma_2(f_m) \\ \vdots \\ \log Ma_l(f_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log O_1(f_m, R_{m1}) \\ \log O_2(f_m, R_{m2}) \\ \vdots \\ \log O_{N_m}(f_m, R_{mN_m}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

N_D 个距离分段 l 个震源项

式中:权重系数 ω_1 和 ω_2 用来表示路径衰减的约束条件, N_m 表示频率 f_m 可用的傅里叶幅值谱的数量,其震源距($R_{m1}, R_{m2}, \cdots, R_{mN_m}$)按照递增顺序排列。

路径衰减项修正的观测记录水平向 S 波的傅里叶幅值谱可表示为震源项(E)和场地项(G)的叠加,即

$$\ln[O_{ij}(f_m, R_{ij})/A_{ij}(f_m, R_{mk})] = \ln E_i(f_m) + \ln G_j(f_m) \quad (3)$$

求解式(3)时,需要分配震源项与场地项之间的权衡,一般通过将某一个或几个台站的场地作为参考场地来解决这一问题,参考场地通常是场地放大近似可忽略的完整的出露坚硬岩石场地或是近似不存在场地放大效应的多个岩石场地(平均场地放大效应为 1)或者是已知放大效应的场地,王宏伟等^[26]介绍了参考场地选择及其对谱反演的影响。

有多种求解式(2)、式(3)的方法,包括奇异值分解法(SVD)、最小二乘法(LSQ)、同步迭代技术(SIRT)。Parolai 等^[27]对比了 3 种求解方法,当频率大于 12 Hz 时,基于 SIRT 计算的震源谱和品质因子均与先验假设存在较大差异,且 ≥ 12 Hz 高频段的场地效应与先验假设有一定偏差,但 SVD 和 LSQ 方法则表现优越。本文将采用 SVD 方法反演路径衰减项和场地效应。

2 强震动数据及筛选

Ren 等^[28]已开发了**中国强震动记录 Flatfile**,涵盖了**中国数字强震动观测台网**在 2007 ~ 2020 年获取的 10 626 组自由场三分量强震动观测记录,完成了记录的基本信息核查、波形质量检查、人工数据处理、地震动强度指标计算。在此基础上,按照如下原则从处理后的强震动记录中筛选出用于谱反演分析的记录:1)震级 < 6.5 ,近似满足地震视作点源的条件;2)震源距 ≤ 120 km,确保截取的 S 波部分尽可能的不受尾波干扰;3)水平向最大地面峰值加速度

$PGA < 100 \text{ cm/s}^2$,尽可能确保场地不发生非线性反应;4)受滤波低频截止频率(f_{lc})和 高频截止频率(f_{hc})的影响,记录的可用频段为 $1.25f_{lc} - f_{hc}/1.25$ ^[29],可用记录的数量随频率变化,在满足以上原则的前提下,在每个频率上,每个台站至少获取 4 组可用记录,每次地震事件至少被 4 个台站获取到可用记录。最终,本文共筛选出 258 个台站在 406 次 2.5 ~ 6.4 级地震中获取的 3 279 组强震动记录。对选取的记录,截取两个水平分量的 S 波,在其首尾分别加余弦边瓣窗并补足够多的零,计算 S 波傅氏谱并利用 Konno 和 Ohmachi^[30]窗函数平滑傅氏谱,最后将两个水平分量 S 波傅氏谱的均方根用于谱反演分析。图 1 给出了选用的台站和地震震中位置,主要集中在 7 个区域,即南天山西部、宁夏北部、京津冀、龙门山断裂带、四川东南部 - 云南东北部、云南西北部、云南东南部,本文将分别基于各区域强震动记录的谱反演分析计算台站的场地效应。表 1 给出了各区域选用记录、地震、台站的基本信息。

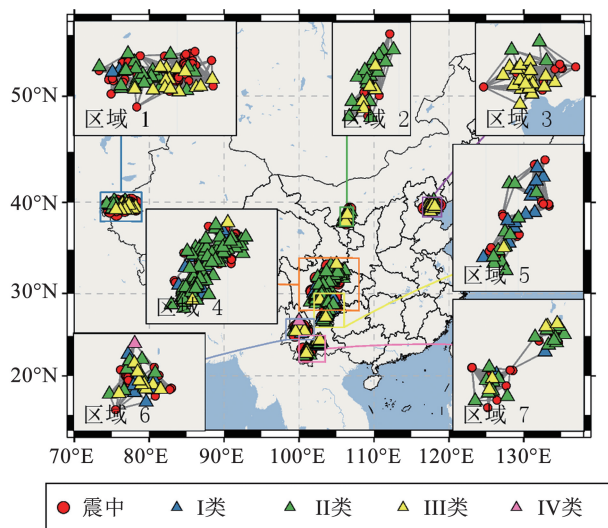


图 1 选用记录的台站(三角形)和地震震中(圆形)位置
Fig. 1 Map showing the locations of strong-motion stations (triangles) and epicenters (circles) for the selected recordings

表 1 各区域选用记录的基本信息

Tab. 1 Basic information on recordings selected for each study region

区域编号	区域名称	记录数	频率范围/Hz	地震数	震级范围	台站数	参考台站	R_0/km
1	南天山西部	446	0.30 ~ 16.00	58	3.0 ~ 5.8	37	065KSU	9.54
2	宁夏北部	124	1.65 ~ 25.00	12	2.4 ~ 4.6	23	—	8.46
3	京津冀	112	0.70 ~ 20.60	10	3.4 ~ 5.0	24	—	6.97
4	龙门山断裂带	2 064	0.35 ~ 25.00	256	2.7 ~ 6.4	98	062WIX	12.06
5	四川东南部 - 云南东北部	187	0.69 ~ 25.00	29	3.2 ~ 6.0	26	053DGX	7.58
6	云南西北部	199	0.40 ~ 25.00	21	3.3 ~ 6.3	26	053WZJ	14.51
7	云南东南部	147	0.53 ~ 18.30	20	2.5 ~ 5.9	24	053NRM	10.40

为确定各区域内用于谱反演的频率范围和参考距离(即最小震源距),图 2 给出了各区域内随频率变化的可用记录数量及最小震源距,可以看到随频率增大可用记录逐渐增多,最小震源距减小,为保证任意频率上参与反演的记录足够多且参考距离足够小,本文采用的最低频率/最高频率/最小震源距分

别为 0.30 Hz/16 Hz/9.54 km(南天山西部)、1.65 Hz/25 Hz/8.46 km(宁夏北部)、0.70 Hz/20.6 Hz/6.97 km(京津冀)、0.35 Hz/25 Hz/12.06 km(龙门山断裂带)、0.69 Hz/25 Hz/7.58 km(四川东南部 - 云南东北部)、0.40 Hz/25 Hz/14.51 km(云南西北部)、0.53 Hz/18.30 Hz/10.40 km(云南东南部)。

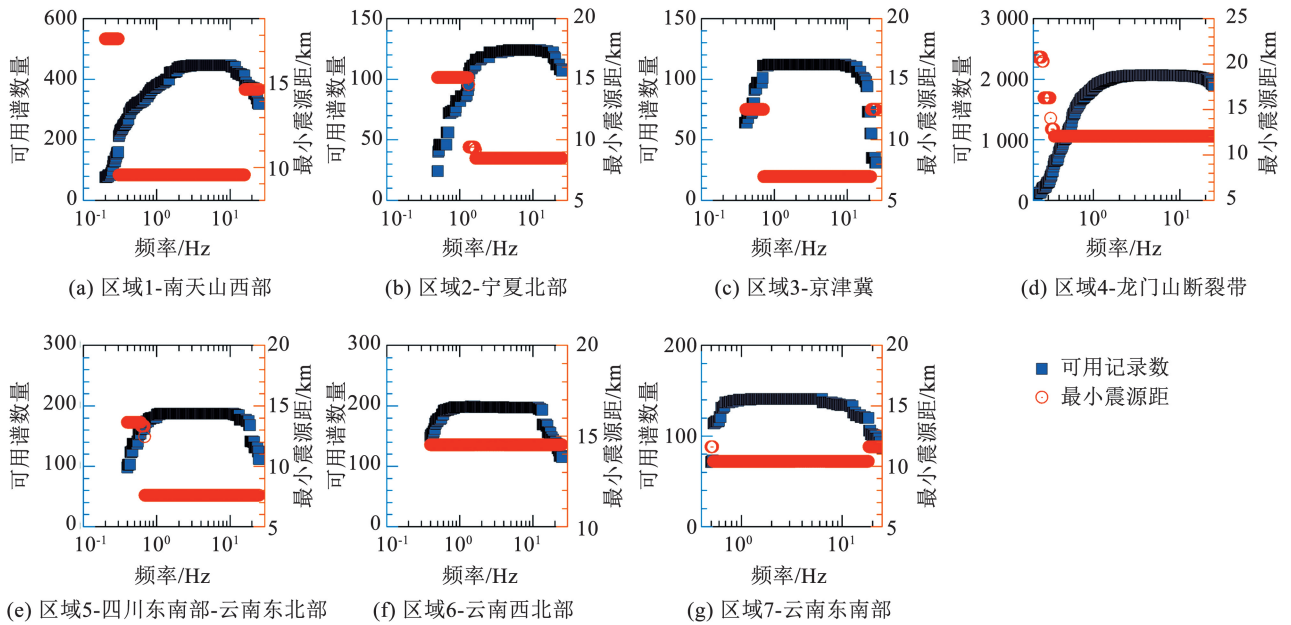


图 2 各区域可用记录数量、最小震源距随频率的变化

Fig. 2 The number of usable recordings and the minimum hypocentral distance varied with frequency in each region

第二步反演台站的场地效应时,需要提前给定各区域参考场地的场地效应。宁夏北部的 23 个台站以及京津冀区域的 24 个台站均布设于《中国建筑抗震规范》^[31]定义的Ⅱ、Ⅲ类场地上,场地的 V_{s30} 范围是 163 ~ 550 m/s,难以选出合适的参考场地。当有条件得到个别台站所在场地或临近场地的深达基岩的钻孔剪切波速结构时,通过一维或二维场地效应分析计算得到场地放大效应,也可作为参考场地用于后续分析。本文分别选取位于岩石场地的 065KSU、062WIX、053DGX、053WZJ、053NRM 台站作为南天山西部、龙门山断裂带、四川东南部 - 云南东北部、云南西北部、云南东南部的参考场地,根据台站场地工程地质勘察报告,065KSU、062WIX、053DGX、053WZJ 台站场地均为《中国建筑抗震规范》^[31]定义的Ⅰ₁类场地(岩石剪切波速 V_s 在 500 ~ 800 m/s)或 NEHRP 定义的 B 类场地($V_{s30} = 760 \sim 1\,500$ m/s)^[32],053NRM 台站场地为《中国建筑抗震规范》^[31]定义的Ⅰ₁类场地或 NEHRP 定义的 C 类场地($V_{s30} = 360 \sim 760$ m/s)。对于岩石场地,可近似利用记录的水平/垂直谱比(HVSR)结果作为场地效应^[33-34],本文利用观测记录的 HVSR 计算了 5 个台站的场地效应,结果如图 3 所示,可以看到谱

比曲线在整个频段上平坦且幅值较小,主要在1.0 ~ 2.0 范围内,岩石场地的地震动放大效应主要是地壳剪切波速梯度和岩石表层风化层综合作用的结果。

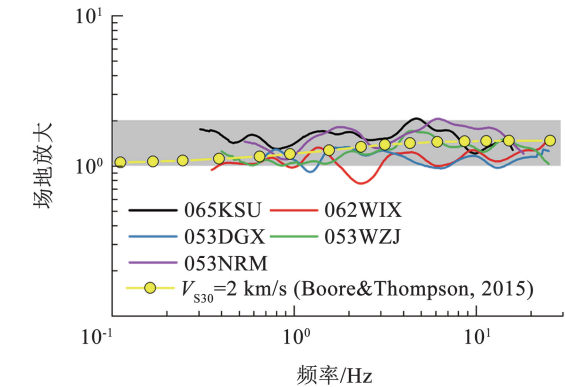


图 3 基于水平/垂直谱比法的参考台站场地效应

Fig. 3 Site effects at reference sites based on the horizontal-to-vertical spectral ratio method

3 场地效应结果与讨论

3.1 场地类别相关的场地效应经验模型

本文反演给出了 211 个强震动台站的场地效应,如图 4 (a) 所示,其中 I (没有区分 I₁ 和 I₀)、II、III、IV 类场地分别有 42、136、32、1 个。

图 4(b) ~ (d) 给出了 I、II、III 类场地的平均场地效应及标准差,详见表 2。尽管同类场地的场地放大效应存在很大的不确定性,但 I、II、III 类场地的平均场地效应整体上仍存在差异,I 类场地的平均场地效应低于 II、III 类场地,0.3 ~ 20.0 Hz 频

段内 I 类场地平均放大效应在 1.0 ~ 2.0 之间变化,与周期无明显的相关性,3.0 ~ 10.0 Hz 频段内的平均放大效应略高。II 类场地的卓越频率在 3.5 Hz 附近,平均放大效应峰值约为 3.5,在 < 3.5 Hz 频段内明显低于 III 类场地平均放大效应,在 3.5 ~ 20.0 Hz 频段内则略高于 III 类场地。III 类场地的卓越频率在 1.6 Hz 附近,平均放大效应峰值约为 5.0。I、II、III 类场地卓越频率的变化体现了随土层硬度的增大卓越频率增大的一般认识,较软弱土层对较低频率的地震动具有更大的放大效应。Fu 等^[35] 基于 2021 年云南漾濞地震序列强震动记录的谱反演分析,给出了 36 个强震台站的场地效应,参考 NEHRP 分类标准提供了 A、B、C、D 类场地的放大系数,本研究给出的 I、II 类场地平均放大效应分别与 Fu 等^[35] 给出的 B ($V_{s30} = 760 \sim 1\,500$ m/s)、C ($V_{s30} = 360 \sim 760$ m/s) 类场地的放大效应接近,参考 Xie 等^[36] 建立的中国场地类别与 V_{s30} 的对应关系, I₁ 类和 II 类场地的 V_{s30} 主要分布范围分别为 566 ~ 971 m/s (均值 742 m/s)、269 ~ 480 m/s (均值 359 m/s),分别与 NEHRP 的 B、C 类场地相当。I、II、III 类场地的场地效应在大于 20、10、11 Hz 均出现明显的高频下降特征,这反映了傅氏谱的高频快速衰减特性,通常采用高频衰减参数 κ 来表示^[37], Ktenidou 等^[38] 在总结前人研究基础上认为 κ 主要与场地相关,体现了岩石表层风化层对地震波的衰减,因此,本研究给出的各类场地的平均场地效应已包括了高频衰减。

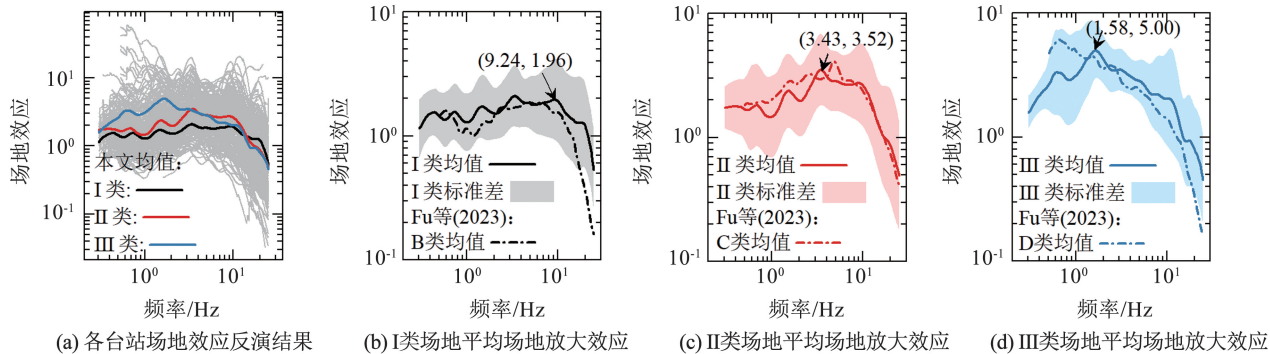


图 4 各台站场地效应的反演结果与按照场地类别分组的平均放大效应

Fig. 4 The inverted site effect at each station and the mean site effect grouped by the site classes

表 2 I、II、III 类场地的平均场地效应及自然对数标准差

Tab. 2 Node points of mean site effect and standard deviation in natural logarithmic scale for sites categorized into Class- I , Class- II , and Class- III , respectively

频率 f /Hz	I 类场地		II 类场地		III 类场地	
	均值	标准差 (ln)	均值	标准差 (ln)	均值	标准差 (ln)
0.304	1.145	0.542	1.727	0.393	1.570	0.271
0.353	1.385	0.463	1.763	0.448	1.898	0.281
0.409	1.527	0.425	1.771	0.494	2.209	0.316

表 2(续)

频率 f/Hz	Ⅰ类场地		Ⅱ类场地		Ⅲ类场地	
	均值	标准差(ln)	均值	标准差(ln)	均值	标准差(ln)
0.474	1.511	0.444	1.731	0.523	2.468	0.390
0.549	1.362	0.487	1.655	0.691	2.995	0.654
0.636	1.416	0.503	1.779	0.773	3.289	0.791
0.737	1.555	0.520	1.747	0.752	3.128	0.843
0.854	1.398	0.523	1.508	0.736	2.871	0.836
0.990	1.284	0.534	1.463	0.754	3.096	0.821
1.147	1.361	0.524	1.622	0.732	3.541	0.729
1.330	1.633	0.549	2.106	0.704	4.214	0.689
1.541	1.703	0.591	2.366	0.683	4.848	0.570
1.786	1.578	0.539	2.134	0.674	4.788	0.489
2.069	1.508	0.471	1.965	0.660	4.081	0.440
2.398	1.599	0.502	2.244	0.669	3.511	0.421
2.779	1.807	0.531	2.762	0.648	3.437	0.385
3.220	2.065	0.557	3.379	0.660	3.446	0.388
3.732	2.000	0.537	3.371	0.633	3.177	0.354
4.325	1.843	0.446	2.910	0.569	2.952	0.337
5.012	1.844	0.487	2.834	0.557	2.812	0.390
5.808	1.786	0.535	2.720	0.534	2.547	0.466
6.731	1.834	0.598	2.652	0.560	2.214	0.568
7.800	1.871	0.651	2.671	0.631	2.202	0.698
9.039	1.957	0.731	2.742	0.723	2.069	0.773
10.475	1.840	0.767	2.511	0.765	2.030	0.907
12.139	1.538	0.766	1.995	0.781	1.786	0.925
14.067	1.385	0.778	1.410	0.806	1.199	0.741
16.302	1.274	0.843	1.062	0.900	0.922	0.816
18.892	1.267	0.821	0.934	1.008	0.882	0.811
21.893	0.957	0.729	0.710	1.070	0.691	0.831

我国《建筑抗震设计规范》^[31]规定根据覆盖层厚度 H 和等效剪切波速 V_{se} 来划分场地类别,我国不同区域的不同类别场地的 H 和 V_{se} 存在系统性差异,且剪切波速剖面的差异也十分明显^[39],例如:与川滇地区相比(本文区域 4、5、6、7),新疆地区(本文区域 1)场地钻孔的 H 值更小而 V_{se} 更大,新疆地区钻孔剪切波速剖面的临界深度约为 13 km,从地表至临界深度,剪切波速约从 220 m/s 增大至 480 m/s,川滇地区钻孔剪切波速剖面的临界深度约为 20 km,从地表至临界深度,剪切波速约从 200 m/s 增大至 400 m/s。图 5 给出了不同区域(区域 1 – 南天山西部、区域 4 – 龙门山断裂带、区域 5/6/7 – 云南)的相同类别场地的场地效应,同类别场地的场地效应区域性差异十分明显,云南地区 I 类场地在 <20 Hz 频段的场地反应在 1.2 ~ 1.3 范围,但龙

门山断裂带区域的 I 类场地随频率有更为明显的变化,在 1 ~ 10 Hz 频段内有略明显的放大效应(约 2.0),南天山西部和云南地区 III 类场地的差异十分明显,云南地区 III 类场地在较低频段(约 1 Hz)放大效应显著,而南天山西部地区 III 类场地的场地效应在低频段并未表现出更显著的放大效应。因此,应重视场地效应的区域性差异,为提高地震动预测、地震风险评估的可靠性,建议采用区域的场地放大效应。

不同类别场地的放大效应的不确定性很大,虽然平均场地效应存在明显差异,但不同类别场地的加减一倍标准差范围的场地效应的差异并不显著,为此,本文从场地效应的角度讨论场地分类的原则。本文基于 K-means 聚类分析分别将区域 1、区域 4、区域 5/6/7 的台站场地按照场地效应计算结果分为 3 个簇类别^[40]。以区域 4 的 19 个 I 类和 77 个 II 类

场地为例,图 6 展示了基于聚类的场地效应簇类结果,采用场地效应聚类分析结果,更能体现出场地的差异,根据场地效应,除少数 II 类场地被划分到簇类 3 外,区域 4 近似相等数量的 II 类场地被划分到簇类 1、2,绝大多数的 I 类场地划分到簇类 1, II 类和 I 类场地中划分为簇类 1 场地的场地效应更为接近。图 7 给出了各个区域内不同类别场地根据场地效应的聚类分析结果,根据场地效应, II 类场地普遍会进一步划分到簇类 1、2、3;区域 1 和区域 4 的 I 类场地多数情况下被划分到簇类 1,但区域 5/6/7 的

I 类场地近似有相同数量被划分到簇类 1 和簇类 2;区域 1 的 III 类场地基本上被划分为簇类 2,区域 5/6/7 的 III 类场地则主要被划分为簇类 1、3。通过场地效应的聚类分析可以认识到,现行规范依据 H 和 V_{se} 的场地分类原则可能在区分场地效应方面不够理想, H 和 V_{se} 这两个参数与场地效应的相关性可能并不显著,见图 8;其次, H 和 V_{se} 与场地效应的相关性可能存在区域性的差异,如果仅考虑 H 和 V_{se} 这两个参数作为场地分类依据,可能在不同区域采用不同的标准有助于提高场地分类的可靠性。

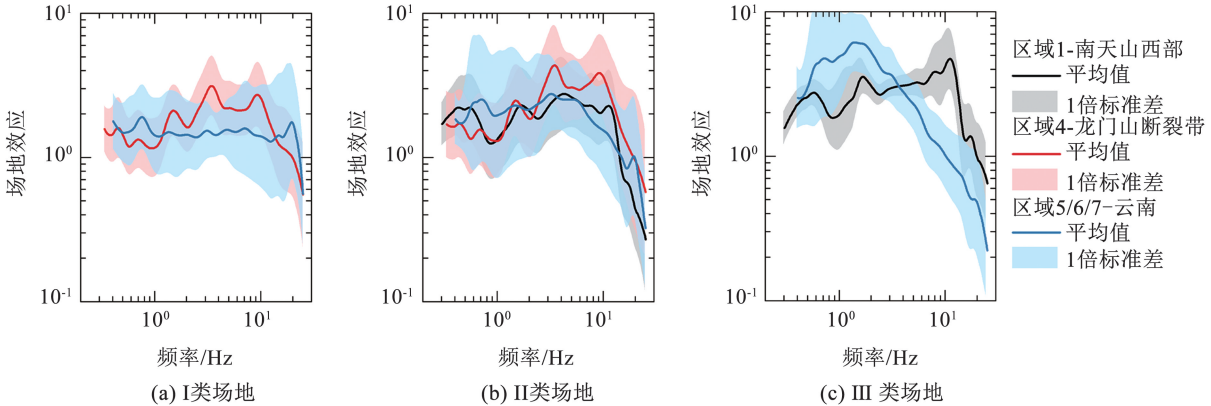


图 5 多区域的不同场地类别的场地效应对比
Fig. 5 The site effects for different site classes within various regions

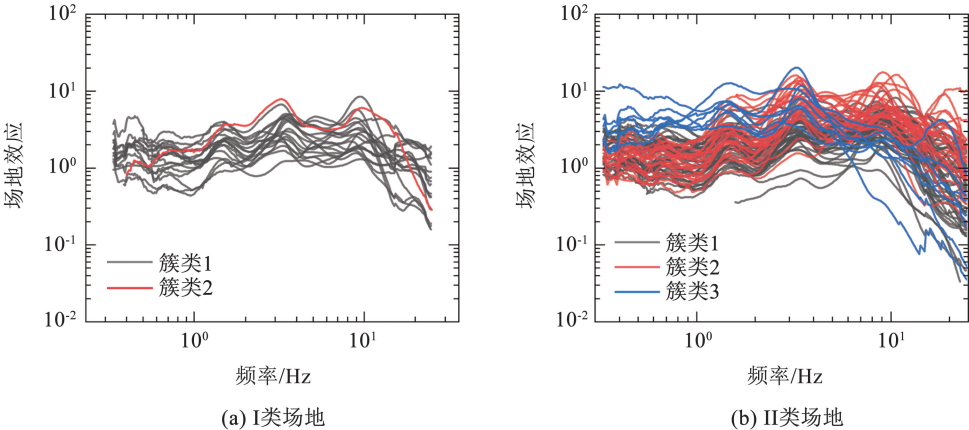


图 6 区域 4 的 I 类和 II 类场地基于场地效应的聚类结果

Fig. 6 Cluster results based on site effects at Class- I and Class- II sites within region 4

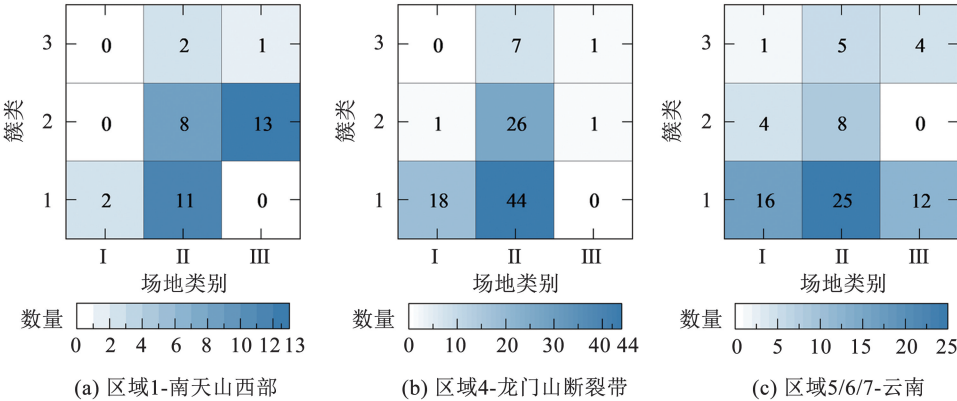


图 7 基于场地效应的不同区域台站场地的聚类结果

Fig. 7 Cluster results based on the site effects at sites within various regions

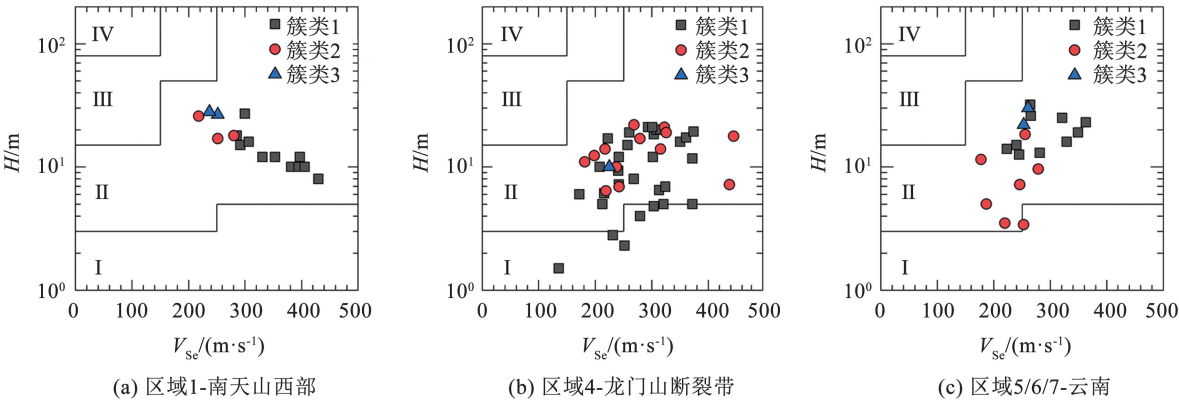


图8 基于场地效应的聚类分析结果与场地分类指标(H 和 V_{se})的关系

Fig. 8 Relationship between the site classification index (i. e. , H and V_{se}) and the cluster analysis results according to the site effect

3.2 V_{s30} 相关的场地效应经验模型

在经验地考虑地震动的场地效应时,国际上通常采用与 V_{s30} 相关的场地效应经验模型。图9(a)、(b)、(c)给出了1.0、3.0和7.5 Hz的场地放大效应随 V_{s30} 的变化以及回归分析结果,场地剪切波速 V_{s30} 在175~883 m/s范围内,我们注意到,在 V_{s30} 小于400 m/s时,场地放大效应与 V_{s30} 有明显的相关性,且低频段(≤ 3.0 Hz)表现出负相关,高频段(>3.0 Hz)表现出正相关,Ren等^[41]在计算新西兰场

地放大效应与场地 V_{s30} 的关系时也发现相似的规律,其他研究有相同的结论^[42-43]。当 $V_{s30} > 400$ m/s时,场地放大效应与 V_{s30} 的相关性不明显,随 V_{s30} 的增大,场地放大效应略有增大或略有减小的趋势。因此,本文将场地效应表示为 V_{s30} 相关的双段线性关系模型,即

$$\log_{10} G = \begin{cases} a + b \log_{10} (V_{s30}) & V_{s30} \leq V_h \\ a + b \log_{10} (V_h) + c \log_{10} (V_{s30}/V_h) & V_{s30} > V_h \end{cases}$$

(4)

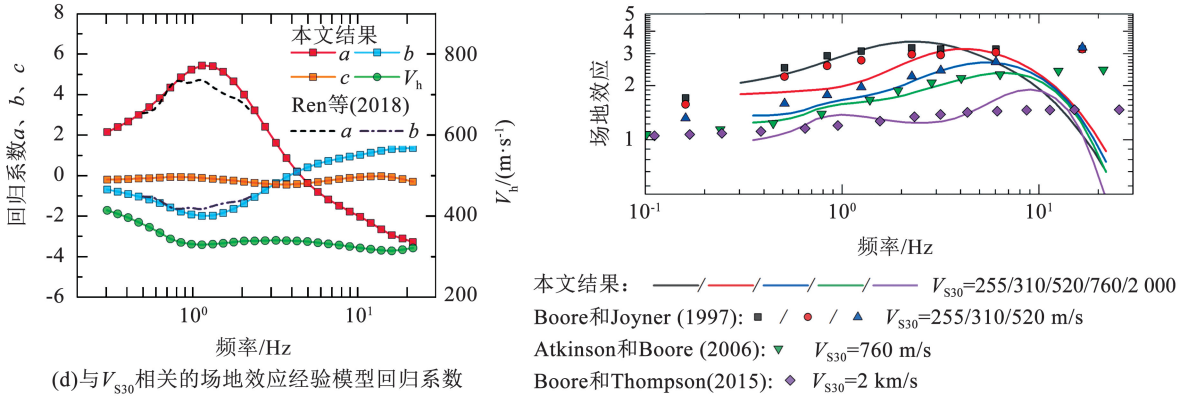
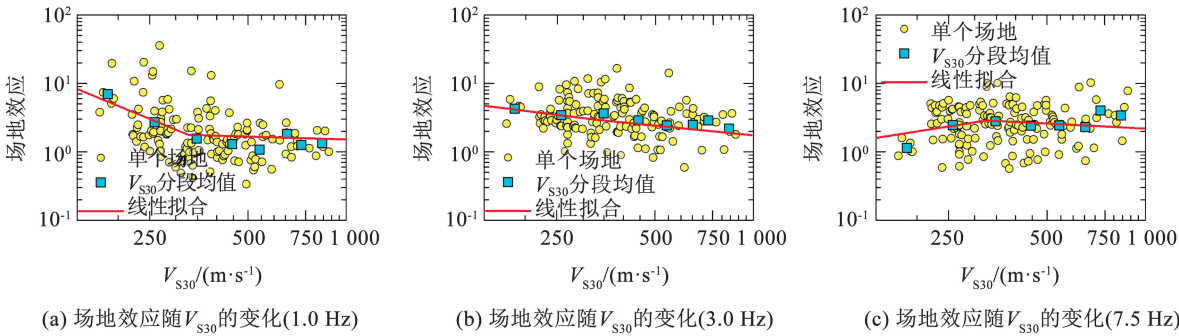


图9 基于 V_{s30} 的场地效应分析结果

Fig. 9 Analysis of site effects based on V_{s30}

根据最小二乘法给出了各个频率的回归系数 a 、 b 、 c 、 V_h ,如图 9(d)所示,具体结果详见表 3。低频段(<3.0 Hz)回归系数 a 和 b 分别在 $2.11 \sim 5.40$ 和 $-2.04 \sim -0.74$ 范围内,这与 Ren 等^[41]、Dutta 等^[42]的结果接近。图 9(e)给出了 V_{s30} 分别为 255(软土场地)、310(土)、520(硬土或软岩)、760(一般岩石)和 2 000 m/s(完整硬岩石)场地条件的经验场地放大系数, $V_{s30}=760$ 和 2 000 m/s 可用来表示岩石场地或地壳放大效应。图中同时对比了其他研究给出的相同 V_{s30} 场地的场地效应,例如 $V_{s30}=2$ km/s 的地壳放大效应^[44], $V_{s30}=760$ m/s 的地壳放大效应^[45], $V_{s30}=255、310、520$ m/s 的土层或软岩场地放大效应。本文给出的场地效应包括了高频衰减特性,因此在高频段(>10 Hz)与其他结果并不一致,其他结果主要是根据区域的钻孔剪切波速平均剖面的一维等效线性化方法计算给出的场地效应,在场地效应中不考虑高频衰减。对比本文与其他研究的结果,在中低频段($0.3 \sim 10$ Hz)具有很好的一致性。

表 3 各频率点的回归系数 a 、 b 、 c 、 V_h
Tab. 3 Regression coefficients a , b , c , and V_h at each frequency

频率 f /Hz	a	b	c	$V_h/(m \cdot s^{-1})$
0.304	2.107	-0.744	-0.248	411.658
0.353	2.347	-0.839	-0.233	403.147
0.409	2.629	-0.951	-0.215	393.361
0.474	2.960	-1.082	-0.194	382.234
0.549	3.344	-1.235	-0.171	369.756
0.636	3.790	-1.412	-0.146	355.726
0.737	4.319	-1.622	-0.124	340.513
0.854	4.815	-1.819	-0.125	332.302
0.990	5.200	-1.969	-0.139	327.960
1.147	5.402	-2.043	-0.166	326.667
1.330	5.368	-2.020	-0.203	327.660
1.541	5.100	-1.902	-0.248	330.053
1.786	4.617	-1.696	-0.300	333.196
2.069	3.962	-1.421	-0.356	335.995
2.398	3.192	-1.100	-0.411	336.009
2.779	2.373	-0.761	-0.456	336.540
3.220	1.564	-0.430	-0.485	336.999
3.732	0.812	-0.124	-0.490	336.704
4.325	0.153	0.141	-0.470	335.831
5.012	-0.404	0.362	-0.426	334.217
5.808	-0.860	0.539	-0.365	331.816
6.731	-1.228	0.678	-0.294	328.862
7.800	-1.537	0.790	-0.225	325.549
9.039	-1.818	0.888	-0.163	322.073
10.475	-2.091	0.979	-0.117	318.654
12.139	-2.381	1.073	-0.089	315.452
14.067	-2.699	1.174	-0.083	312.653
16.302	-3.001	1.263	-0.118	311.104
18.892	-3.165	1.290	-0.223	314.251
21.893	-3.342	1.317	-0.347	318.400

4 结 论

我国强震动观测台网在 2007 ~ 2020 年收集了约 1.2 万组自由场三分量强震动观测记录,为评估地震动的场地效应提供了重要的基础数据。本文重点针对南天山西部、龙门山断裂带、云南地区的密集观测记录开展广义谱反演分析,计算了 211 个强震动观测台站的场地效应,得到了以下主要结论。

1)我国建筑抗震规范定义的 I、II、III 类场地的场地效应在平均意义上存在差异,本研究给出了 I、II、III 类场地的平均放大效应经验模型,可在整个频段上体现出不同类别的场地对地震动影响的差异。I 类场地的平均场地效应低于 II、III 类场地, I 类场地平均放大效应随频率无明显变化,在 $1.0 \sim 2.0$ 范围波动;II 类场地的卓越频率在 3.5 Hz 附近,平均放大效应峰值约为 3.5, III 类场地的卓越频率在 1.6 Hz 附近,平均放大效应峰值约为 5.0;小于 3.5 Hz 频段的 II 类场地平均放大效应明显低于 III 类场地,3.5 ~ 20.0 Hz 频段则略高于 III 类场地。

2)同类别场地的场地效应区域性差异十分明显,龙门山断裂带和云南的 I 类场地的放大效应有明显差异,南天山西部和云南的 III 类场地的放大效应也存在显著差异。

3)基于场地效应的聚类分析结果,本研究发现我国规范定义的场地分类指标(H 和 V_{se})与场地效应的相关性并不明显,有很大比例的 II 类场地可能与 I 类场地的场地效应更接近,同时, H 和 V_{se} 与场地效应的相关性可能存在区域性的差异。

4)本文建立了与 V_{s30} 相关的场地效应经验模型,该经验模型整体上够能体现场地条件的影响,与其他研究给出的 V_{s30} 相关的场地效应较为接近。

为提高地震动预测和地震风险评估的可靠性,本研究建议应重视场地效应的区域性差异,优先采用基于区域特性的场地放大效应。同时,建议探索与场地效应相关性更优的新型场地分类指标,并针对不同区域建立差异化的场地分类标准体系。

参考文献

[1]KAWASE H. History of our understanding on the effects of surface geology on seismic motions: can we see a new horizon? [C]// Proceedings of the 6th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion. Kyoto: International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior & International Association for Earthquake Engineering, 2021

[2]BORCHERDT R D. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1970, 60(1): 29. DOI:10.1029/E0050i010p00552

[3]HUDSON D E. Local distribution of strong earthquake ground

motions[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1972, 62(6): 1765. DOI:10.1785/BSSA0620061765

[4] BARD P Y, CAMPILLO M, CHAVEZ-GARCIA F J, et al. The Mexico earthquake of September 19, 1985—A theoretical investigation of large-and small-scale amplification effects in the Mexico City Valley[J]. *Earthquake Spectra*, 1988, 4(3): 609. DOI: 10.1193/1.1585493

[5] KAWASE H. The cause of the damage belt in Kobe: “The basin-edge effect,” constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves[J]. *Seismological Research Letters*, 1996, 67(5): 25. DOI:10.1785/gssrl.67.5.25

[6] TALLETT-WILLIAMS S, GOSH B, WILKINSON S, et al. Site amplification in the Kathmandu Valley during the 2015 M 7. 6 Gorkha, Nepal earthquake[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016, 14: 3301. DOI: 10.1007/s10518-016-0003-8

[7] SEXTOS A, DE RISI R, PAGLIAROLI A, et al. Local site effects and incremental damage of buildings during the 2016 Central Italy earthquake sequence [J]. *Earthquake Spectra*, 2018, 34(4): 1639. DOI: 10.1193/100317eqs194m

[8] SMERZINI C, PAOLUCCI R, STUPAZZINI M. Comparison of 3D, 2D and 1D numerical approaches to predict long period earthquake ground motion in the Gubbio plain, Central Italy[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2011, 9: 2007. DOI: 10.1007/s10518-011-9289-8

[9] 中国国家标准化管理委员会. 工程场地地震安全性评价: GB 17741—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005

Standardization Administration of the People’s Republic of China. Evaluation of seismic safety for engineering sites: GB 17741—2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005

[10] KAMAI R, ABRAHAMSON N A, SILVA W J. Nonlinear horizontal site amplification for constraining the NGA-West2 GMPEs [J]. *Earthquake Spectra*, 2014, 30(3): 1223. DOI: 10.1193/070113EQS187M

[11] LERMO J, CHÁVEZ-GARCÍA F J. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1993, 83(5): 1574. DOI:10.1007/BF00806251

[12] ANDREWS D J. Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size[J]. *Earthquake Source Mechanics*, 1986, 37: 259. DOI:10.1029/GM037p0259

[13] CASTRO R R, ANDERSON J G, SINGH S K. Site response, attenuation and source spectra of S waves along the Guerrero, Mexico, subduction zone[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1990, 80(6A): 1481. DOI:10.1016/0009-2541(90)90068-I

[14] STEIDL J H, TUMARKIN A G, ARCHULETA R J. What is a reference site? [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(6): 1733. DOI: 10.1785/bssa0860061733

[15] CADET H, BARD P Y, RODRIGUEZ-MAREK A. Site effect assessment using KiK-net data: Part 1. A simple correction procedure for surface/downhole spectral ratios [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2012, 10: 421. DOI:10.1007/s10518-011-9323-x

[16] ITO E, NAKANO K, NAGASHIMA F, et al. A method to directly estimate S-wave site amplification factor from horizontal-to-vertical spectral ratio of earthquakes (eHVSRs) [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, 110(6): 2892. DOI: 10.1785/0120190315

[17] FIELD E H, JACOB K H. A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1995, 85(4): 1127. DOI: 10.1785/BSSA0850041127

[18] BONILLA L F, STEIDL J H, LINDLEY G T, et al. Site amplification in the San Fernando Valley, California: Variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, 87(3): 710. DOI: 10.1029/96JB03485

[19] WANG H, REN Y, WEN R. Source parameters, path attenuation and site effects from strong-motion recordings of the Wenchuan aftershocks (2008—2013) using a non-parametric generalized inversion technique[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 212(2): 872. DOI:10.1093/gji/ggx447

[20] FU L, LI X, WANG F, et al. A study of site response and regional attenuation in the Longmen Shan region, eastern Tibetan Plateau, SW China, from seismic recordings using the generalized inversion method[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 181: 103887. DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.103887

[21] DANG P, CUI J, YANG H, et al. Regional spectral characteristics, quality factor and site responses in western-central Sichuan, China (I): Application of parametric generalized inversion technique [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 176: 108303. DOI:10.1016/j.soildyn.2023.108303

[22] LI J, ZHOU B, RONG M, et al. Estimation of source spectra, attenuation, and site responses from strong-motion data recorded in the 2019 Changning earthquake sequence [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, 110(2): 410. DOI:10.1785/0120190207

[23] 王宏伟, 温瑞智, 任叶飞. 考虑区域特征的地震动模拟——以 2020 年伽师 MS6.4 地震为例[J]. *地震地质*, 2021, 43(2): 430

WANG Hongwei, WEN Ruizhi, REN Yefei. Seismic ground motion simulation considering regional characteristics: A case study of the Jashi MS6.4 earthquake in 2020 [J]. *Seismology and Geology*, 2021, 43(2): 430. DOI:10.3969/j.issn.0253-4967.2021.02.011

[24] 刘奥懿, 荣棉水, 李小军, 等. 滇西南地区品质因子、场地反应与震源参数研究[J]. *震灾防御技术*, 2022, 17(3): 454

LIU Aoyi, RONG Mianshui, LI Xiaojun, et al. Study on quality factor, site effect, and source parameters in southwest yunnan[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2022, 17(3): 454. DOI: 10.11899/zzfy20220305

[25] OTH A, PAROLAI S, BINDI D, et al. Source spectra and site response from S waves of intermediate-depth Vrancea, Romania, earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009, 99(1): 235. DOI:10.1785/0120080059

[26] 王宏伟, 任叶飞, 温瑞智, 等. 地震动非参数化谱反演可靠性分析[J]. *西南交通大学学报*, 2022, 57(1): 182

WANG Hongwei, REN Yefei, WEN Ruizhi, et al. Reliability analysis on non-parametric spectral inversion of seismic ground motion [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2022, 57(1): 182. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20200241

[27] PAROLAI S, BINDI D, AUGLIERA P. Application of the generalized inversion technique (GIT) to a microzonation study:

- Numerical simulations and comparison with different site-estimation techniques[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(2): 286. DOI:10.1111/j.1651-2227.1979.tb04975.x
- [28] REN Y, YAO X, KISHIDA T, et al. Introduction to the strong motion flat file of China covering the period from 2007 to 2020[C]//The 18th World Conference on Earthquake Engineering. Milan: International Association for Earthquake Engineering, 2024
- [29] ABRAHAMSON N A, SILVA W J. Empirical Response Spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes [J]. *Seismological Research Letters*, 1997, 68(1): 94. DOI:10.1785/gssrl.68.1.94
- [30] KONNO K, OHMACHI T. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, 88(1): 228. DOI: 10.1785/bssa0880010228
- [31] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016
- China Academy of Building Research. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016
- [32] XIE J, LI X, WEN Z, et al. Soil profile database and site classification for national strong-motion stations in western China[J]. *Seismological Research Letters*, 2022, 93(3): 1930. DOI: 10.1785/0220210271
- [33] ATKINSON G M, CASSIDY J F. Integrated use of seismograph and strong-motion data to determine soil amplification: Response of the Fraser River Delta to the Duvall and Georgia Strait earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(4): 1028. DOI:10.1785/0119990098
- [34] SIDDIQI J, ATKINSON G M. Ground-motion amplification at rock sites across Canada as determined from the horizontal-to-vertical component ratio[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(2): 877. DOI:10.1785/0120010155
- [35] FU L, CHEN S, LI J, et al. Regional spectral characteristics derived using the generalized inversion technique and applications to stochastic simulation of the 2021 M_w 6.1 Yangbi earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2023, 113(1): 378. DOI:10.1785/0120220088
- [36] XIE J, LI K, LI X, et al. VS30-based relationship for Chinese site classification [J]. *Engineering Geology*, 2023, 324: 107253. DOI:10.1016/j.enggeo.2023.107253
- [37] ANDERSON J G, HOUGH S E. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1984, 74(5): 1969. DOI:10.1016/0040-1951(83)90236-6
- [38] KTENIDOU O J, COTTON F, ABRAHAMSON N A, et al. Taxonomy of κ : A review of definitions and estimation approaches targeted to applications[J]. *Seismological Research Letters*, 2014, 85(1): 135. DOI:10.1785/0220130027
- [39] YAO X, ZHANG P, ZHAO Y, et al. Region-dependent site conditions in China: Evidence from borehole data statistics [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 1107921. DOI: 10.3389/feart.2022.1107921
- [40] LIU Y, REN Y, WEN R, et al. An optimization suggestion for site classification scheme in Chinese seismic code based on clustering analysis of site amplification [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 187: 109018. DOI: 10.5194/egusphere-egu25-5907
- [41] REN Y, ZHOU Y, WANG H, et al. Source characteristics, site effects, and path attenuation from spectral analysis of strong-motion recordings in the 2016 Kaikōura earthquake sequence[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2018, 108(3B): 1757. DOI: 10.1785/0120170290
- [42] DUTTA U, BISWAS N, MARTIROSYAN A, et al. Estimation of earthquake source parameters and site response in Anchorage, Alaska from strong-motion network data using generalized inversion method[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2003, 137(1-4): 13. DOI:10.1785/0120000119
- [43] HASSANI B, ZAFARANI H, FARJOODI J, et al. Estimation of site amplification, attenuation and source spectra of S-waves in the East-Central Iran[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(10): 1397. DOI:10.1016/j.soildyn.2011.05.017
- [44] BOORE D M, THOMPSON E M. Revisions to some parameters used in stochastic-method simulations of ground motion [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(2A): 1029. DOI:10.1785/0120140281
- [45] ATKINSON G M, BOORE D M. Earthquake ground-motion prediction equations for eastern North America[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96(6): 2181. DOI:10.1785/0120050245

(编辑 吕雪梅)