

局部场地条件对新疆地区地震危险性的影响研究

李仕国¹⁾ 谢俊举^{1)*} 李昌珑¹⁾ 李柯苇^{1,2)}

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100871 北京大学地球与空间科学学院

摘要 新疆地区地震活动频繁，地质条件复杂，局部场地条件对地震产生的强地面运动和工程震害有重要影响。基于区域剪切波速分布和场地分类资料，研究了新疆地区场地覆盖土层对区域地震危险性的影响。使用中国第五代地震动参数区划图中的潜在震源三级划分方法和 Bindi 等提出的区域地震动衰减模型，基于新疆地区场地剪切波速分布和场地分类，给出了新疆地区基岩I₁类场地 ($v_{S30}=742 \text{ m/s}$) 和实际场地的 50 年超越概率 63%，10% 和 2% 的地震动峰值加速度 (PGA) 及周期为 0.2 s, 0.5 s 和 1 s 的反应谱加速度 (Sa) 的危险性结果。根据地震危险性分析结果考察了不同超越概率下新疆地区II类和III类场地相对于I₁类场地的地震危险性差异，统计得到土层场地的不同概率水平的地震动参数调整系数。结果表明：受场地覆盖土层影响，PGA 以及 0.2 s, 0.5 s 和 1 s 的反应谱加速度在塔里木和准噶尔盆地等土层较软地区有明显放大作用，而在阿尔泰山、天山和昆仑山脉等硬岩地区，相同概率水平的地震动参数有明显的降低。II类和III类场地反应谱加速度调整系数，在不同周期的调整系数相差较大，呈现出随周期的增大先增大再减小的规律，在周期为 0.4 s 时调整系数为最大，显示出场地影响在不同周期的显著差异；对于不同超越概率水平，II, III 类场地的地震动调整系数几乎相同，这表明场地调整系数受区域地震危险性水平的影响较小。与五代图的平均调整系数相比，新疆地区 I₁类场地的调整系数偏小，而III类场地的调整系数则偏大。本研究对于抗震设防考虑区域场地条件的影响具有参考价值。

关键词 场地条件 概率地震危险性 调整系数 新疆地区

doi: 10.11939/jass.20250023 中图分类号: P315.09 文献标识码 A

Impact of Local Site Conditions on Seismic Hazard in the Xinjiang Region

Li Shiguo¹⁾ Xie Junju^{1)*} Li Changlong¹⁾ Li Kewei^{1,2)}

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: The Xinjiang region in northwestern China is characterized by complex geological structures and frequent seismic activity. The spatial distribution of ground motion intensity and

基金项目 国家重点研发计划课题（2022YFC3003503）和新疆维吾尔自治区重点研发专项课题（2020B03006-4）共同资助。

收稿日期 2025-02-25 收到初稿，2025-04-05 决定采用修改稿。

作者简介 李仕国，在读硕士研究生，主要从事地震危险性与场地效应方面的研究，e-mail: lishiguo2000@163.com; * 通讯作者. 谢俊举，博士，研究员，主要从事强地面运动、场地效应和地震危险性方面的研究，e-mail: xiejunju@163.com

seismic damage to engineering structures in this area is critically influenced by local site conditions. To systematically evaluate site effects on ground motion parameter distribution, this study investigates the influence of overlying soil layers on regional seismic hazard using spatial distributions of shear-wave velocity (V_{S30}) and site classification data.

Adopting the three-level potential seismic source division from China's Fifth-Generation Seismic Zonation Map and integrating Bindi et al.'s regional ground motion attenuation model, we performed probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) using the OpenQuake platform. Our analysis compares seismic hazard parameters —including peak ground acceleration (PGA) and spectral accelerations (Sa) at 0.2 s, 0.5 s, and 1.0 s periods - between reference rock sites (Class I₁, $V_{S30}=742$ m/s) and actual site conditions. Results are presented for three 50-year exceedance probabilities: 63% (frequent), 10% (design basis), and 2% (maximum considered). Spatial distribution maps were generated, and site-specific adjustment coefficients were statistically derived through comparative analysis of Site Classes II/III versus Class I₁.

Key findings reveal: (1) OpenQuake-derived hazard estimates align with Fifth-Generation Map trends, showing significant PGA/Sa amplification in soft soil basins (Tarim and Junggar) versus attenuation in hard rock regions (Altai/Tianshan/Kunlun mountains); (2) Spectral adjustment coefficients for Classes II/III exhibit period-dependent variation, peaking at ~0.4 s with maximum values of 1.87 (Class II) and 3.15 (Class III) under design-level conditions; (3) Site Class III demonstrates markedly higher amplification effects compared to the reference rock Site Class I₁ than those observed in Site Class II. Furthermore, the adjustment coefficients for both site classes show minimal variation across different exceedance probabilities, indicating that regional seismic hazard levels exert negligible influence on site-specific amplification phenomena; (4) Compared to national averages, Xinjiang-specific adjustment coefficients show reduced values for Class I₁ and elevated values for Class III, suggesting potential over-conservatism in rock site design and under-estimation for soft soils when applying national standards.

This study establishes a framework integrating regional site models, attenuation relationships, and probabilistic analysis to characterize site-dependent ground motion variability in Xinjiang. Our results provides critical insights for incorporating site-specific effects into seismic fortification strategies in Xinjiang, particularly for infrastructure resilience in basin regions with thick soil sediments.

Key words: site conditions; probabilistic seismic hazard; adjustment factors; Xinjiang region

引言

我国位于环太平洋地震带与欧亚地震带交汇处，受板块挤压影响，断裂带高度发育，地震频发且灾害严重。据国家地震科学数据中心统计，近 20 年间我国已发生 6.0 级以上地震约 150 次，其中包括 2008 年汶川 8.0 级地震等重大灾害性事件。这些地震造成了大量人

员伤亡和巨大经济资源损失，对国家经济发展和社会稳定构成了严峻挑战。因而，开展科学、系统的地震危险性评估显得尤为重要，通过合理、准确地评估高地震烈度地区的地震危险性，可以为工程结构抗震设计和防灾减灾决策提供科学依据。

场地条件对地震动特性和震害分布有显著影响。国内外震害研究表明（Wood, 1908；胡聿贤等, 1980；薄景山等, 2021），场地覆盖土层对地震波的传播有较大影响，表现为对地震地面运动的选择性放大，并直接影响到地震灾害的严重程度及分布。例如，1923年日本关东大地震、1976年唐山大地震以及1985年墨西哥大地震等都观测到软弱场地导致的震害加重和烈度异常现象。基于强震动观测的研究结果表明，场地条件会对地震动的幅值（如地震动峰值加速度等）和频谱特性产生显著影响（胡聿贤等, 1980；Dravinski *et al.*, 2003）。因此，在地震危险性分析和抗震设防中考虑局部场地条件的影响具有重要意义。

我国编制的GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》（中国第五代地震动参数区划图，简称五代图）（中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会, 2016）在考虑场地覆盖土层影响时，是以I₁类基岩场地的地震危险性分析结果为基准，通过统一的场地放大系数调整得到II类场地的结果。该方法主要依据不同场地类别的场地调整系数的平均统计结果，未与当地土层剪切波速等参数建立关系，故未能较好体现不同地区场地条件的区域差异。

本文基于概率地震危险性分析方法，结合新疆地区的区域场地条件特征，开展区域概率地震危险性分析，研究区域场地条件对地震危险性的影响，建立不同场地类别的土层场地地震危险性参数（峰值加速度和多周期反应谱加速度）相对于基岩场地的调整系数模型，为新疆地区地震危险性评估考虑区域场地条件影响提供科学依据。

1 概率地震危险性分析

地震危险性分析方法主要分为确定性方法（deterministic method）和概率性方法（probabilistic method）。确定性地震危险性分析基于构造地震活动相似性和历史地震复发性两个基本假设，通过识别潜在震源及最大可信地震，评估目标区域的地震最大烈度。概率地震危险性分析方法（probabilistic seismic hazard assessment，缩写为PSHA）则通过构建概率统计模型，采用数值积分方法计算工程场地在指定时间段内地震动强度参数（intensity measure，缩写为IM）（如峰值加速度（peak ground acceleration，缩写为PGA）、反应谱加速度（spectral acceleration，缩写为Sa））的超越概率，进而生成地震危险性曲线及区域地震动参数分布图，从而实现场地地震风险的量化评估。该理论框架由Cornell（1968）首次系统提出，其核心表达式如公式（1）所示。

$$\lambda(IM > im) = \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_{r_{min}}^{r_{max}} P(IM > im|m, r) f_M(m) f_R(r) dm dr \#(1)$$

式中， $\lambda(IM > im)$ 表示地震动强度参数IM超过给定阈值im的年超越概率， $P(IM > im|m, r)$ 为条件概率，表征在震级 $M = m$ 和震源距 $R = r$ 条件下，地震动强度IM超过阈值im的概率。 $f_M(m)$ 和 $f_R(r)$ 分别为震级M和震源距R的概率密度函数，描述其统计分布特征。

为充分表征中国地震活动的时空非均匀特性，国内学者基于经典概率地震危险性分析（PSHA）框架，创新发展了考虑地震活动时空非均匀性的概率地震危险性分析方法（简称为CPSHA方法）（潘华等, 2013）。CPSHA方法的地震活动性模型满足以下三个基本假定：

①地震统计区内震级的概率分布 $P(m_j)$ 遵循截断型G-R关系（Gutenberg-Richter Relation，古登堡-里克特关系）（Gutenberg, Richter, 1944）：

$$P(m_j) = \frac{2 \exp[-\beta(m_j - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{uz} - m_0)]} \cdot sh\left(\frac{\beta}{2} \Delta m\right) \#(2)$$

将连续震级范围离散化为 N_m 个等间距震级分档， m_j 为第 j 个震级档（ $m_j - \frac{1}{2}\Delta m \leq m_j \leq m_j + \frac{1}{2}\Delta m$ ）的中心震级， Δm 为震级间隔。式（2）中， $\beta = b\ln 10$ ， b 为地震统计区G-R关系的**b**值，表征地震频度-震级比例系数； m_0 为地震统计区震级下限； m_{uz} 为统计区震级上限。

②地震统计区内年地震发生次数 N 服从泊松过程，其发生 n 次地震的概率为：

$$P(N = n) = \frac{(v_0)^n \exp(-v_0)}{n!} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \#(3)$$

式中 v_0 为统计区内震级 $M \geq m_0$ 的年均发生率。

③地震统计区内的地震空间分布遵循地震活动率在不同潜在震源区之间存在显著差异，单个潜在震源区内的地震发生概率服从空间均匀分布，其联合概率模型可表述为：

$$P((x, y) | m_j) = f_{i, m_j} \cdot \frac{1}{A_i} \#(4)$$

式中， $P((x, y) | m_j)$ 为震级档 m_j 地震在空间点 (x, y) 的条件发生概率密度，由地震统计区各潜在震源区及潜在震源区内各点的地震发生概率共同决定。 f_{i, m_j} 为统计区内震级档 m_j 地震归属于第*i*个潜在震源区的权重因子， A_i 为第*i*个潜在震源区的空间面积，其倒数表征震源区内的均匀分布特性。

将三个假设结合地震动预测的概率分布，可推导出场点的地震危险性计算公式：

$$P(A \geq a)_k = \sum_{j=1}^{N_m} \iint P(A \geq a | m_j, (x, y)_{ki}) \cdot P(m_j)_k \cdot P((x, y)_{ki} | m_j)_k dx dy \#(5)$$

$P(A \geq a)_k$ 表示第*k*个地震统计区内的第*i*个潜在震源区内随机发生一次震级为 m_j 、位置 (x, y) 的地震造成场点地震动参数 $A \geq a$ 的年超越概率。

综合式（2）、式（3）、式（5）可得场点地震动参数 A 超越给定值 a 的年超越概率：

$$P(A \geq a) = 1 - \exp \left[- \sum_{k=1}^{N_Z} \sum_{j=1}^{N_m} \sum_{i=1}^{N_{ks}} \iint P(A \geq a | m_j, (x, y)_{ki}) \cdot \frac{v_{0k} f_{ki, m_j}}{A_{ki}} \cdot \frac{2 \exp[-\beta_k(m_j - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{uz_k} - m_0)]} \cdot \text{sh} \left(\frac{\beta_k}{2} \cdot \Delta m \right) dx dy \right] \#(6)$$

2 新疆地区区域场地特征

新疆位于欧亚大陆板内变形核心区（张培震等，2003），其构造地貌呈现典型的“盆山相间”格局，由三大造山带环绕两大沉积盆地构成。阿尔泰造山带横亘北缘，昆仑造山带构成南界，天山造山带作为中央活动构造系将全疆分隔为北疆准噶尔前陆盆地系统和南疆塔里木克拉通盆地系统（邓起东等，2002）。新疆区域内地震带主要分布有阿尔泰地震带、天山地震带、西昆仑山地震带和阿尔金地震带等（朱传庆等，2008），地震活动强烈，破坏性地震频发。

场地地表以下30 m岩土层的平均剪切波速 V_{S30} 被广泛地应用于考虑局部场地覆盖土层对地震动和地震危险性的影响，其能有效描述线性和非线性条件下的一阶场地效应（Ahdi *et al.*, 2022）。为考虑新疆地区场地条件对区域地震危险性的影响，本研究采用Li等（2025）¹基于全国10650个钻孔数据建立的基于地表地质单元特征和地下基岩深度的 V_{S30} 混合经验模型给出的新疆地区剪切波速分布，如图1（a）所示。该混合模型使用基岩深度作为参数，相较于常用的地形坡度或地貌地形类别更直接代表了地下土层状况。

美国和欧洲等国家和地区的抗震规范采用 V_{S30} 进行场地类别划分，图1（b）给出了新疆地区对应的美国国家地震减灾计划（national earthquake hazards reduction program，缩写为NEHRP）场地分类结果。中国现行的《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）（中华人

¹ Li K W, Xie J J, Li X J, Jiang W X, Zhu C B, Zhang Y. 2025. 100m-resolution site condition map of China based on surface geology and bedrock depth[J]. *Engineering Geology*. (under review)

民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010) 采用场地土层等效剪切波速(其中土层厚度取覆盖土层厚度和 20 m 中较小的值) 和覆盖层厚度 D 的双参数方案, 因此无法直接根据 V_{S30} 给出中国场地分类。Xie 等 (2023) 提供了一种基于 V_{S30} 的中国场地分类映射方法, 利用最大化的正确率确定了各个场地类别的边界值(如表 1 所示), 较好地实现了中美抗震设计规范之间的场地类别转换, 经钻孔数据验证该方法在新疆地区具有较好的匹配性。本文采用 Xie 等 (2023) 映射关系, 利用区域 V_{S30} 分布给出新疆地区场地分类, 如图 1 (c) 所示。结果显示新疆地区场地类别以 II 类和 I₁ 类场地为主, 而在塔里木盆地地区主要为 III 类和 II 类场地。

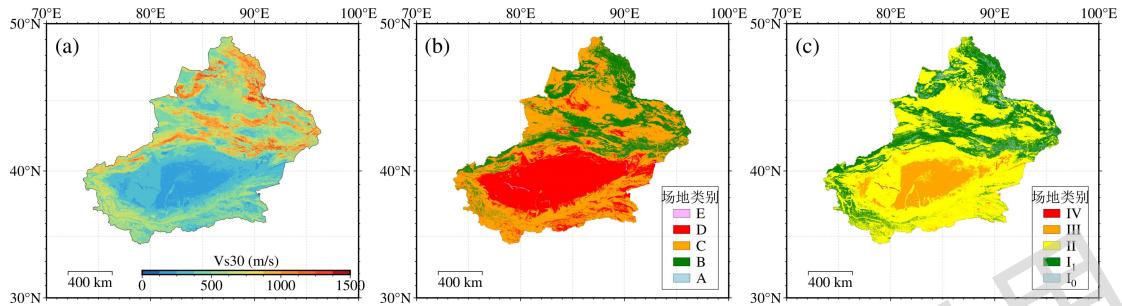


图 1 基于地质单元和基岩深度的新疆地区 V_{S30} 分布(a)以及美国 NEHRP(b)和我国(c)场地分类结果

Fig. 1 V_{S30} distribution in the Xinjiang region based on geological units and bedrock depth (a), and site classification results of NEHRP (USA) (b) and China (c)

表 1 基于 V_{S30} 的中国场地分类映射关系 (Xie et al., 2023)

Table 1 V_{S30} -based mapping relationships for Chinese site classification (Xie et al., 2023)

中国场地类别	边界 V_{S30} 值 (m/s)	平均值 μ_{Inv} (m/s)
I ₀	$V_{S30} \geq 1140$	1373
I ₁	$1140 > V_{S30} \geq 640$	742
II	$640 > V_{S30} \geq 260$	359
III	$260 > V_{S30} \geq 170$	225
IV	$V_{S30} < 170$	152

3 新疆地区地震危险性分析

意大利全球地震模型 (global earthquake model, 缩写为 GEM) 基金会开发的开源地震危险性和风险计算软件 OpenQuake 在各国以及区域地震风险评估中被广泛应用 (Silva et al., 2012; Bindi et al., 2012; 李昌珑等, 2016; Allen et al., 2020)。OpenQuake 软件所构建的 OpenQuake 危险性库 (GITHUB, 2025) 包含用于 PSHA 计算的核心工具以及全球学者构建的地震动预测方程的源代码文件, 并在不断更新中。

本研究使用 OpenQuake 进行新疆地区地震危险性的分析计算, 基于区域潜在震源模型和地震动预测模型并配置衰减关系逻辑树文件, 从而获得目标场点的地震危险性结果。

3.1 震源模型

OpenQuake 可识别的震源类型包括点源、面源及断层源模型。本文采用面源作为潜在震源模型。我国在编制第五代区划图时, 根据地震活动特性及构造采用了潜在震源区三级划分方法 (周本刚等, 2013), 将我国及周边区域划分为 29 个地震带 (地震统计区)、77 个地震构造区 (背景源) 和 1199 个潜在震源区 (构造源)。本文采用与五代图相同的潜在震源和背景源的断层走向、震源深度、震级的上下限以及在各个震级档的空间分布函数 (震源参数) 等。绘制新疆地区的潜在震源区分布图如图 2 所示, 图中不同颜色代表该潜在震源区域内的震级上限值 m_{uz} 。

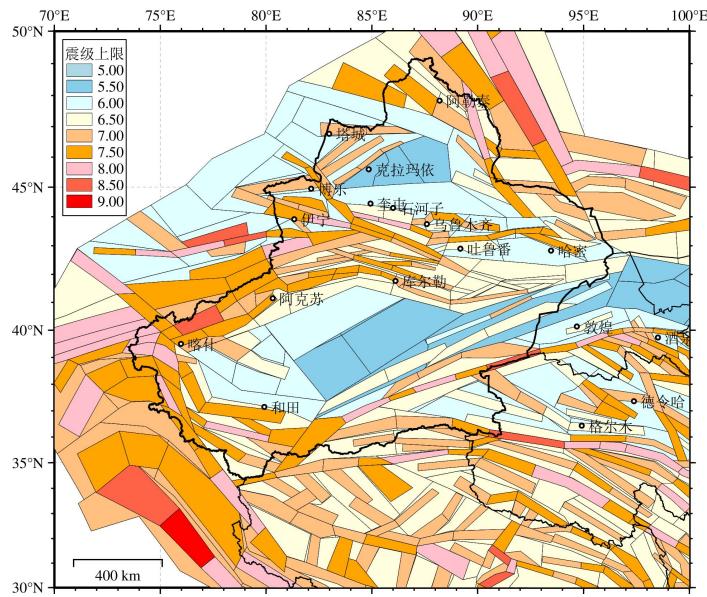


图2 新疆地区潜在震源区分布图

Fig. 2 Distribution map of potential seismic sources in Xinjiang region

3.2 地震动预测模型

地震动衰减模型是依据一定区域内的历史地震数据，采用回归分析方法来估计地震动的经验关系，可描述地震动参数大小与震级和距离的关系。

中国在编制第五代全国区划图所使用的是俞言祥等（2013）建立的衰减关系：

$$\lg Y = A + BM + Clg(R + De^{EM}) \#(7)$$

式中, Y 为地震动参数, M 为面波震级, R 为震中距, A 、 B 、 C 、 D 和 E 为回归系数。地震动参数为地震动峰值加速度(PGA)和峰值速度(peak ground velocity, 缩写为PGV)。该衰减关系充分考虑中国地震活动区域性差异和大震近场饱和特征, 以震级6.5为界, 为我国四个衰减关系分区依照震级分段选取不同的回归系数。由于该衰减关系是建立在基岩场地上的, 并未考虑局部场地条件对地震动的放大(或缩小)作用, 固不可直接用于实际场地的地震危险性分析计算。

美国由于强震记录非常丰富，其衰减关系的发展速度非常迅速。由美国地质调查局（United States geological survey，缩写为 USGS）、太平洋地震工程研究中心（pacific earthquake engineering research center，缩写为 PEER）和地震工程研究所（earthquake engineering research institute，缩写为 EERI）等机构合作开展的下一代衰减模型（next generation attenuation，缩写为 NGA）项目，旨在开发更精确、可靠的地震动衰减模型。在收集分析全球范围内更全面的地震数据后，针对活跃构造状态下的浅层地壳地震开发了最新的 NGA-West2 衰减关系（ASK14, BSSA14, CB14, CY14, IM14），将场地放大项考虑其中，并将场地 V_{S30} 值作为场地项参数。在这些衰减关系中还考虑了盆地放大效应，将 $Z_{1.0}$ 或 $Z_{2.5}$ 作为盆地放大项参数。国内外已有大量学者对 NGA 模型在我国适用性进行详细探讨，并对 5 种地震动衰减关系分配一定的逻辑树权重进行 CPSHA 计算分析(Dangkua et al., 2018; 陈兰生等, 2021)。

Bindi 等 (2012) 对中亚地区进行了 PSHA 研究, 使用面源模型, 仅考虑震源深度小于 50km 的浅源地震, 产出中亚地区 50 年超越概率 10% 的烈度分布图。本文针对新疆地区开展区域地震危险性研究, 采用适用中亚地区的地震动衰减关系, 选用 Bindi 等 (2017) 建立的区域地震动预测模型 (Bindi *et al.*, 2017), 其具体形式如式 (8) 所示。

$$\ln Y = e_1 + F_D(R, M) + F_M(M) + F_S \#(8)$$

式中, Y 为地震动参数, M 为地震震级, R 为距离, e_1 为回归系数。 $F_D(R, M)$ 为距离相

关项，包括基于 Joyner-Boore 距离 (R_{JB}) (见式 (9)) 和震源距 (R_{hypo}) (见式 (10)) 两种形式。 $F_M(M)$ 为震级相关项 (见式 (11))。 F_S 为线性场地放大项 (见式 (12))。

$$F_D(R_{JB}, M) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \ln \left(\sqrt{R_{JB}^2 + h^2} / R_{ref} \right) + c_3 \left(\sqrt{R_{JB}^2 + h^2} - R_{ref} \right) \#(9)$$

$$F_D(R_{hypo}, M) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \ln(R_{hypo}/R_{ref}) - c_3(R_{hypo} - R_{ref}) \#(10)$$

式 (9) 和式 (10) 中， M_{ref} 为参考震级，设定为 4.5； R_{ref} 为参考距离，设定为 1.0； h 为固定深度项； c_1 、 c_2 和 c_3 为回归系数。

$$F_M(M) = \begin{cases} b_1(M - M_{ref}) + b_2(M - M_{ref})^2 & , M < M_h \\ b_3(M - M_h) + b_1(M_h - M_{ref}) + b_2(M_h - M_{ref})^2 & , M \geq M_h \end{cases} \#(11)$$

式中， M_h 为最大震级，设定为 6.5； b_1 、 b_2 和 b_3 为回归系数。

$$F_S = sA \ln(V_{S30}/800) \#(12)$$

式中， sA 为场地放大系数。

考虑到 Bindi 等建立的地震动衰减关系在计算时使用的是矩震级 M_W ，而我国地震动活动模型参数的统计结果是基于面波震级 M_S 的，因此在进行地震危险性计算前需要进行震级转换。本文参照陈兰生等 (2021) 的震级转换方法，对 Rong 等 (2020) 依据我国 1900 至 2015 年地震记录回归统计得到的 3 个时期 (1900—1965 年、1966—1975 年、1976—2015 年) 的震级转换公式进行加权处理，权重分别取 0.565、0.088、0.347。

3.3 基岩场地地震危险性分析结果

对于目标计算场地，网格间距或区间宽度越小，计算的精度越高，但计算量也会随之增加。设定目标区域离散网格间距分别为 2.5 km、5 km、10 km、20 km 计算目标场点的 PGA 值，结果表明网格划分间距小于等于 10 km 时能保证结果的可靠性。为保障计算准确性同时减少不必要的计算，本研究将新疆地区离散为 10 km×10 km 的网状栅格，而将潜在震源区的面源模型离散为 5 km×5 km 的等距点源网格，同时设置 PGA 的截断最大距离为 150 km，结合新疆地区的 V_{S30} 值计算得到考虑实际场地效应的地震危险性。

使用 OpenQuake 软件对新疆地区进行概率地震危险性计算，得到了基于基岩 I₁ 类场地 (取 $v_{S30}=742$ m/s) 50 年超越概率 63% (重现期 50 年)，50 年超越概率 10% (重现期 475 年) 和 50 年超越概率 2% (重现期 2475 年) 的地震动峰值加速度 (PGA) 和多周期下的反应谱加速度值 (Sa)，三种超越概率分别对应于我国抗震设防中的多遇地震动、基本设防地震动、罕遇地震动。结果选取了三种超越概率水平下的 PGA 以及周期分别为 0.2 s、0.5 s、1 s 的 Sa 分布情况进行对比分析。图 3、4、5 分别展示了新疆地区 50 年超越概率 63%、10%、2% 的基岩场地 (I₁ 类) 地震动参数分布，区域地震危险性分析结果与第五代区划图的危险性空间分布基本一致，阿尔泰山脉、天山山脉和昆仑山脉等地的地震危险性明显高于其他地区，PGA 及 Sa 值最大值出现在帕米尔高原南部；塔里木盆地和准噶尔盆地的地震危险性则低于周围地区。在 50 年超越概率 10% 情况下，仅新疆地区西部的有少数范围的地震峰值加速度值在 0.6 g 以上，山脉地区的 PGA 值在 0.2~0.4 g 范围内，而其余地区的 PGA 值则小于 0.2 g。造成该空间分布的主要原因在于阿尔泰、天山和昆仑山脉等地分布较多断裂带，构造活动性显著高于其他地区。对于反应谱加速度值 Sa，在周期取 0.2 s、0.5 s 和 1 s 情况下，危险性的空间分布特征与 PGA 的分布大致相同。罕遇地震情况下，不同周期的基岩地震动参数显著增大。

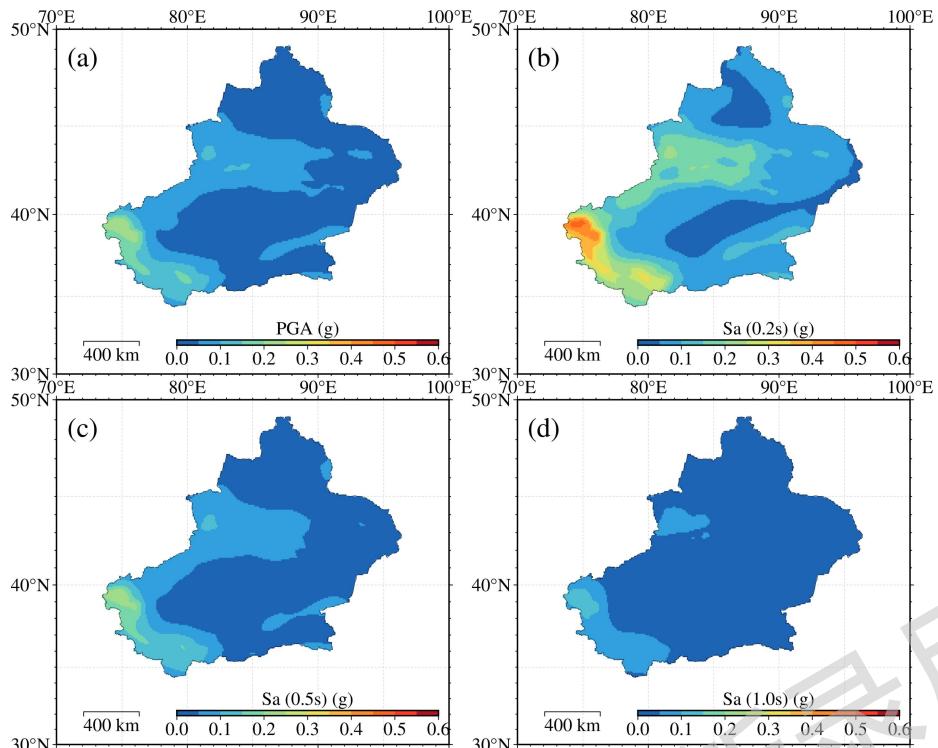


图3 基岩场地 (I₁类) 情况下 50 年超越概率 63% 的 PGA (a)、Sa(0.2 s) (b)、Sa(0.5 s) (c) 和 Sa(1.0 s) (d) 分布图

Fig. 3 Distribution maps of PGA (a), Sa(0.2 s) (b), Sa(0.5 s) (c) and Sa (1.0 s) (d) for bedrock sites (Class I₁) under 63% exceedance probability in 50 years

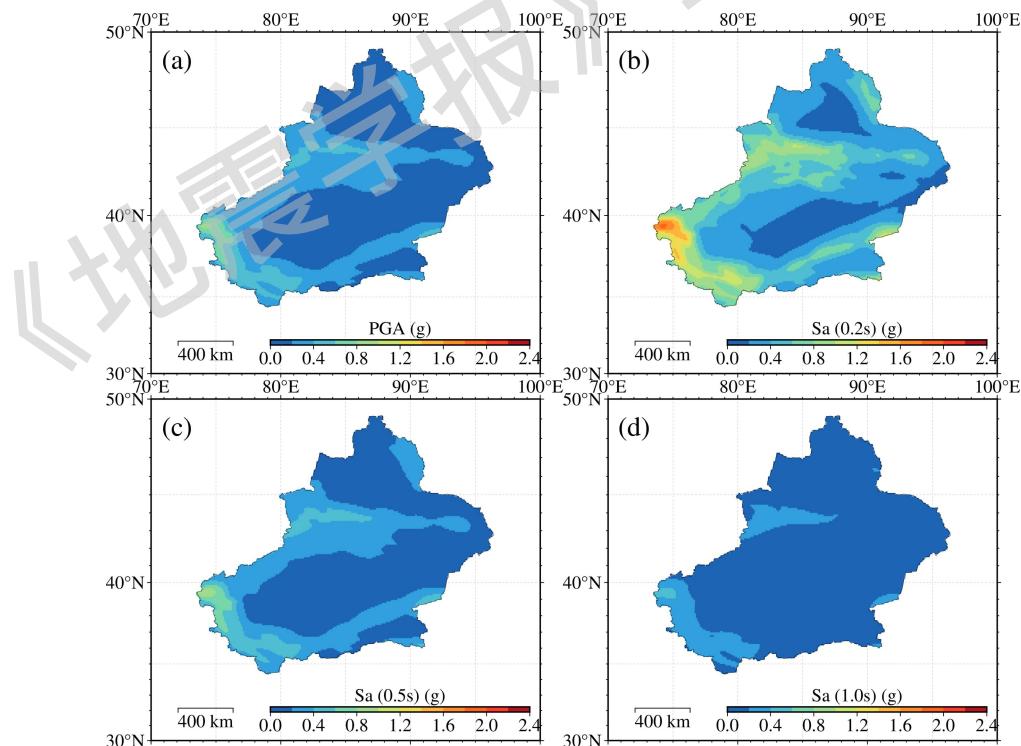


图4 基岩场地 (I₁类) 情况下 50 年超越概率 10% 的 PGA (a)、Sa(0.2s) (b)、Sa(0.5s) (c) 和 Sa(1.0s) (d) 分布图

Fig. 4 Distribution maps of PGA (a), Sa(0.2 s) (b), Sa(0.5s) (c) and Sa (1.0 s) (d) for bedrock sites (Class I₁) under 10% exceedance probability in 50 years

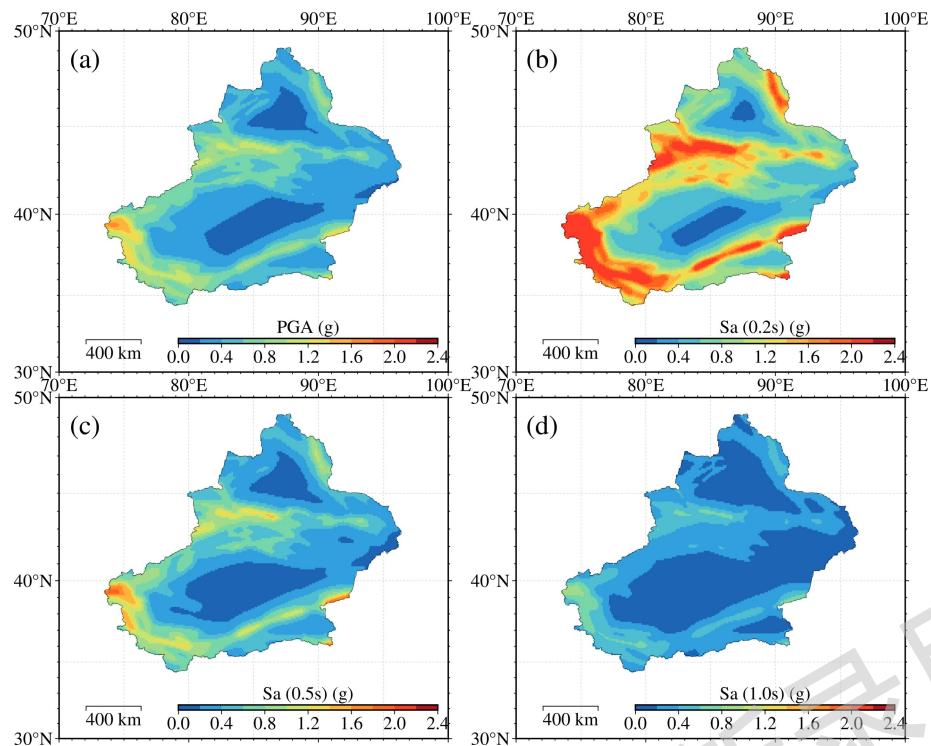


图 5 基岩场地 (I_1 类) 情况下 50 年超越概率 2% 的 PGA (a)、Sa(0.2 s) (b)、Sa(0.5 s) (c) 和 Sa(1.0 s) (d) 分布图

Fig. 5 Distribution maps of PGA (a), Sa(0.2 s) (b), Sa(0.5 s) (c) and Sa (1.0 s) (d) for bedrock sites (Class I_1) under 2% exceedance probability in 50 years

4 场地条件对区域地震动危险性的影响分析

考虑新疆区域场地条件时, 使用基于地表地质单元特征和地下基岩深度的混合 v_{s30} 经验模型结果, 计算了考虑场地覆盖土层影响下多超越概率水平的 PGA 以及周期为 0.2 s、0.5 s 和 1 s 的反应谱加速度值 Sa 的分布结果。图 6、7、8 分别展示了新疆地区 50 年超越概率 63%、10%、2% 的实际场地情况下的地震动参数分布。对比分析基岩场地和实际场地的地震危险性结果, 在考虑基本设防地震动情况 (50 年超越概率 10%) 下, 基岩场地下 PGA 值分布在 0.038g—0.827g 的区间范围内, 考虑场地土层影响下 PGA 值分布在 0.027g—1.500g 的区间范围内。

为对区域场地条件的影响进行量化分析, 本文将相同场点基于实际场地的地震危险性分析结果与基于基岩 I_1 类场地下的地震危险性结果求比值 (如图 9 所示)。结果表明, 受覆盖土层的选择性放大影响, 地震动峰值加速度以及 0.2 s、0.5 s 和 1 s 的反应谱加速度值在塔里木和准噶尔盆地等土层较软地区有明显放大作用, 放大效果随着波速的降低而增大, 反应谱加速度值在周期为 0.5 s 时场地放大效应最明显; 而在阿尔泰山、天山和昆仑山脉等硬岩地区, 相同概率水平的地震动参数有明显的降低, 这些结果一定程度上体现了场地效应对地震动参数的影响特征。

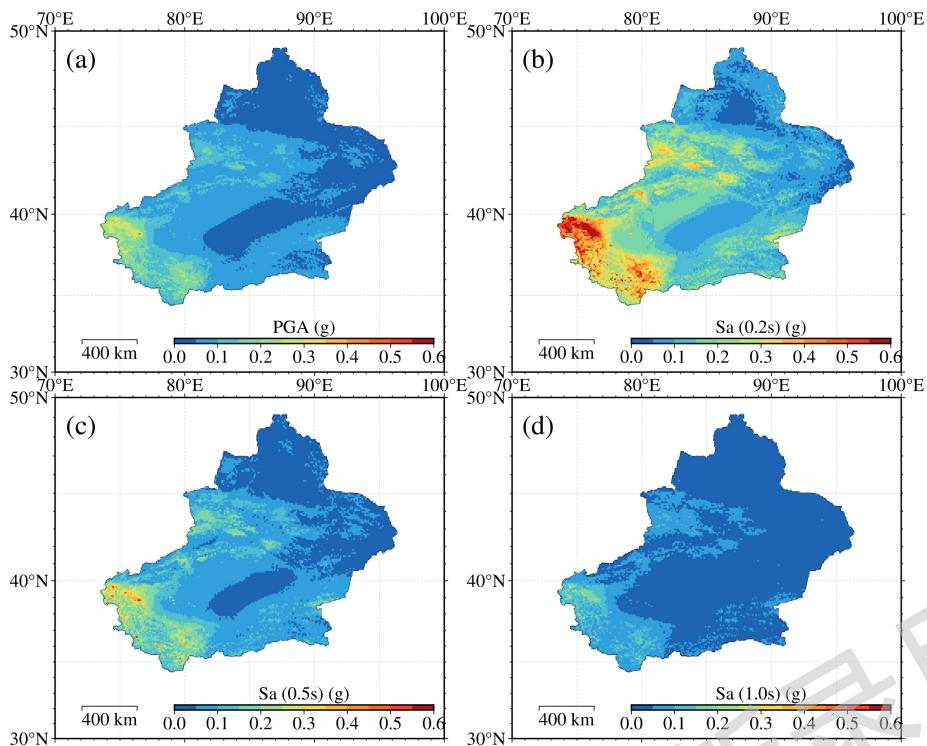


图 6 实际场地情况下 50 年超越概率 63% 的 PGA (a)、Sa(0.2 s) (b)、Sa(0.5 s) (c) 和 Sa(1.0 s) (d) 分布图

Fig. 6 Distribution maps of PGA (a), Sa(0.2 s) (b), Sa(0.5 s) (c) and Sa (1.0 s) (d) for actual sites under 63% exceedance probability in 50 years

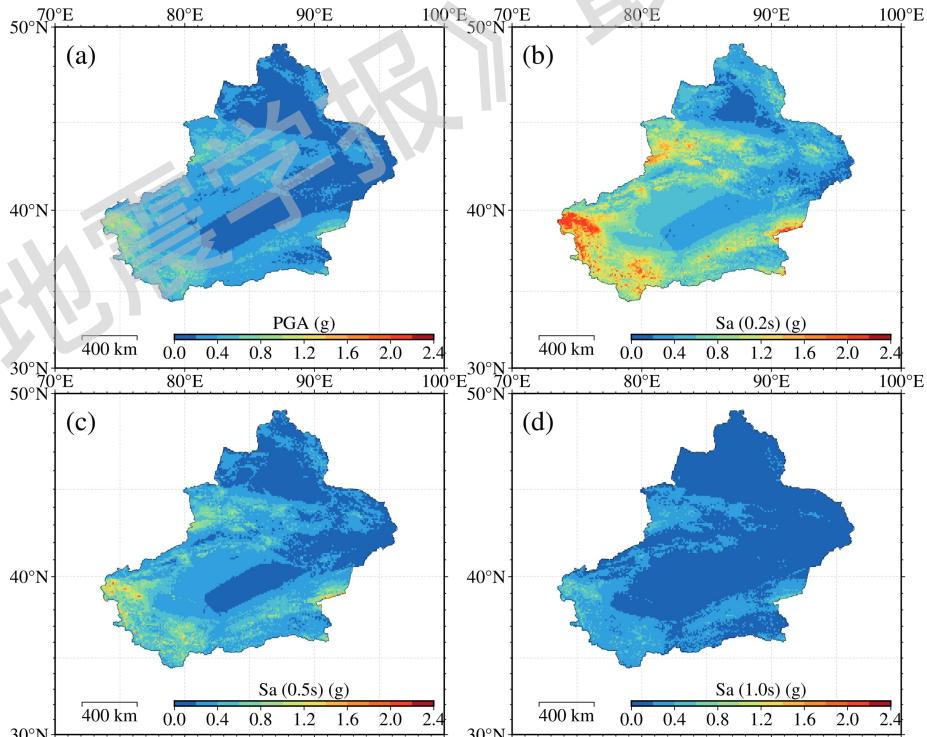


图 7 实际场地情况下 50 年超越概率 10% 的 PGA (a)、Sa(0.2 s) (b)、Sa(0.5 s) (c) 和 Sa(1.0 s) (d) 分布图

Fig. 7 Distribution maps of PGA (a), Sa(0.2 s) (b), Sa(0.5 s) (c) and Sa (1.0 s) (d) for actual sites under 10% exceedance probability in 50 years

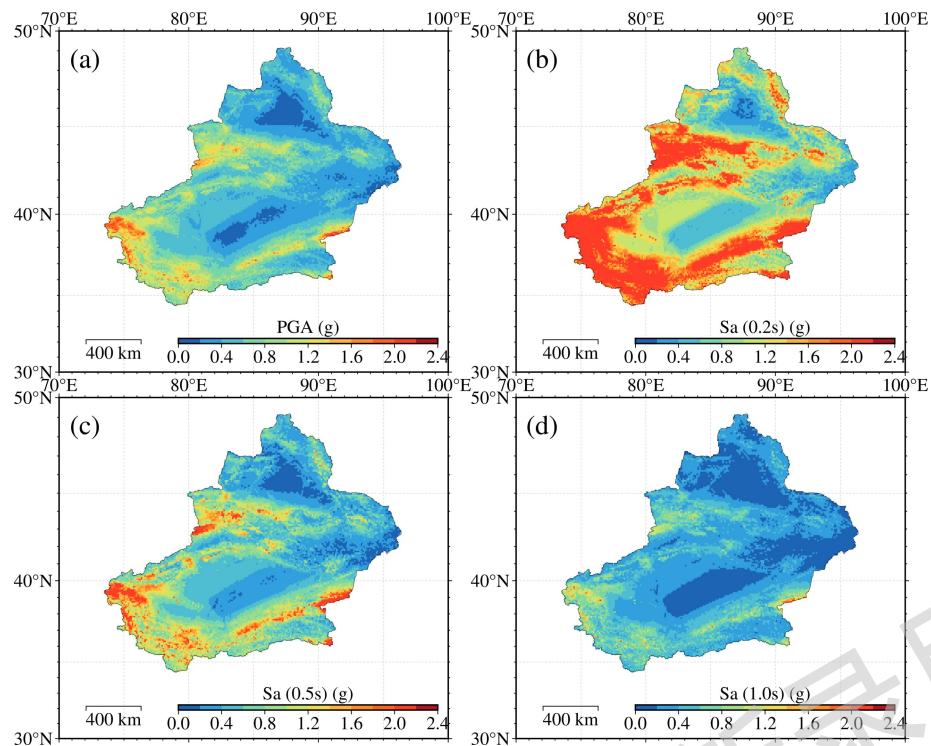


图 8 实际场地情况下 50 年超越概率 2% 的 PGA (a)、Sa(0.2 s) (b)、Sa(0.5 s) (c) 和 Sa(1.0 s) (d) 分布图

Fig. 8 Distribution maps of PGA (a), Sa(0.2 s) (b), Sa(0.5 s) (c) and Sa(1.0 s) (d) for actual sites under 2% exceedance probability in 50 years

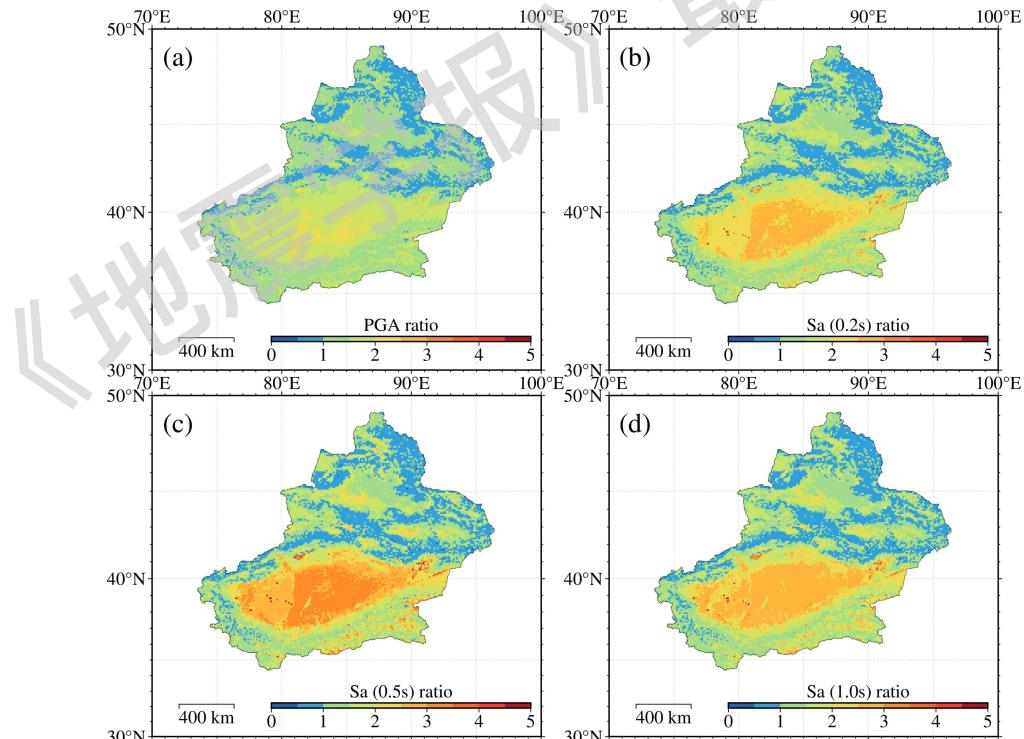


图 9 50 年超越概率 10% 情况下实际场地与基岩场地 (I₁ 类) 的 PGA (a)、Sa(0.2 s) (b)、Sa(0.5 s) (c) 和 Sa(1.0 s) (d) 的比值分布图

Fig. 9 Ratio distribution maps of PGA (a), Sa(0.2 s) (b), Sa(0.5 s) (c) and Sa(1.0 s) (d) between actual sites and bedrock sites (Class I₁) under 10% exceedance probability in 50 years

为了分析不同场地条件对地震危险性的影响，我们将计算的地震危险性结果按照场地类别进行分组。将新疆地区进行 $10\text{km} \times 10\text{ km}$ 的栅格离散后，共生成 16286 个场地网格点。根据场地网格点的 V_{S30} 值，采用表 1 的中国场地分类映射关系，得到整个新疆地区的场地类别结果。结果显示新疆地区主要为 I₁ 类场地、II 类场地及 III 类场地，其中属于 I₀ 类场地的网格点数为 417 个，I₁ 类场地的网格点数为 3968 个，II 类场地的网格点数为 9713 个，III 类场地的网格点数为 2170 个，IV 类场地的网格点数为 18 个。由于 I₀ 类场地和 IV 类场地的网格点数量较少，不确定性较大，故本文主要针对 I₁ 类、II 类和 III 类场地进行统计分析。

在考虑场地土层影响时，本研究在计算地震危险性时，直接在地震动衰减模型中考虑了目标场点的场地条件。考虑到中国 II 类场地分类较为宽泛，导致地震动场地影响离散性较大 (Xie *et al.*, 2023)，本文以基岩 I₁ 类场地 ($V_{S30}=742\text{ m/s}$) 为参考，计算分析其他场地类别的场地影响调整系数。

表 2 不同超越概率下 II 类、III 类场地相对于 I₁ 类场地的 PGA 以及 Sa 调整系数

Table 2 Adjustment factors of PGA and Sa for Site Class II/III relative to Site Class I₁ under different exceedance probabilities

地震动参数	50 年超越概率			
	63%	10%	2%	
II 类相对于 I ₁ 类	PGA	1.445	1.445	1.444
	Sa (0.05s)	1.289	1.289	1.283
	Sa (0.1s)	1.340	1.339	1.293
	Sa (0.2s)	1.664	1.662	1.577
	Sa (0.3s)	1.830	1.829	1.775
	Sa (0.4s)	1.870	1.870	1.846
	Sa (0.5s)	1.855	1.855	1.846
	Sa (0.6s)	1.854	1.854	1.850
	Sa (0.7s)	1.832	1.832	1.830
	Sa (0.8s)	1.783	1.783	1.783
	Sa (0.9s)	1.762	1.767	1.767
	Sa (1.0s)	1.758	1.753	1.753
	Sa (2.0s)	1.612	1.611	1.611
	Sa (3.0s)	1.505	1.506	1.507
III 类相对于 I ₁ 类	Sa (4.0s)	1.450	1.451	1.452
	PGA	1.992	1.992	1.991
	Sa (0.05s)	1.617	1.617	1.613
	Sa (0.1s)	1.757	1.736	1.720
	Sa (0.2s)	2.565	2.560	2.516
	Sa (0.3s)	3.032	3.027	2.987
	Sa (0.4s)	3.149	3.147	3.118
	Sa (0.5s)	3.105	3.104	3.089
	Sa (0.6s)	3.100	3.101	3.091
	Sa (0.7s)	3.037	3.037	3.030
	Sa (0.8s)	2.898	2.898	2.895
	Sa (0.9s)	2.851	2.851	2.849
	Sa (1.0s)	2.816	2.811	2.090
	Sa (2.0s)	2.430	2.421	2.423
	Sa (3.0s)	2.153	2.153	2.151
	Sa (4.0s)	2.020	2.018	2.015

本研究将相同场点的基于实际场地情况下的地震危险性结果与基于基岩 I₁ 类场地 ($V_{S30}=742\text{ m/s}$) 情况下的结果进行对比分析，并根据场地分类结果得到不同超越概率水平下 II 类和 III 类场地相对基岩场地的平均调整系数，如表 2 所示，我们比较反应谱加速度调整系数在不同周期之间的差异，结果表明：II、III 类场地相较于 I₁ 类场地的各地震动参数的调整系数在不同超越概率水平下几乎相同。受覆盖土层的选择性放大作用影响，对于基

岩 I₁ 类场地, II 类场地的地震动峰值加速度平均调整系数为 1.44, III 类场地的平均调整系数为 1.99。说明相对于硬岩场地 (I₁ 类), 中硬度土层 (II 类) 和软土层地区 (III 类) 的 PGA 均有明显的放大。对于加速度反应谱值, 在不同周期, 调整系数相差较大, 显示在不同周期的场地影响的显著差异。在相同超越概率水平下, II 类和 III 类场地反应谱调整系数呈现出随周期的增大先增大后减小的规律, 且均在周期为 0.4 s 时调整系数取得最大值。其可能与土层的共振效应、土层的非线性响应、局部土层结构等因素共同作用有关, 尤其是在主要的 II 类场地地区, 周期 0.4 s 可能接近土层的共振频率, 导致地震动的显著放大。对于基本设防的 50 年超越概率为 10% 的情况下, II 类场地 0.4 s 的反应谱值相对于 I₁ 类场地的调整系数为 1.87, III 类相对于 I₁ 类场地的调整系数为 3.15。总体来看, III 类场地对于 I₁ 类场地的地震危险性放大效应较 II 类场地更明显。

在第五代区划图中考虑场地效应时, 是以 II 类场地为参考, 使用全国范围内各类场地相对于 II 类场地的平均统计结果, 基于地震动调整系数给出考虑场地影响的地震动峰值加速度, 同时按照地震动强度分组, 给出考虑场地非线性效应的调整系数。为了与第五代区划图的调整系数比较, 我们将本文计算的 50 年超越概率 10% 的 PGA 调整系数转换为以 II 类场地作为参考的结果, 并按照区划图的地震动分区进行分组, 给出各类场地进一步考虑非线性效应的场地调整系数, 统计结果如表 3 所示。与五代图所采用的 PGA 调整系数相比, 本文结果在考虑新疆地区场地特征后给出的区域场地影响调整系数, 在 I₁ 类场地相对全国平均结果较小, 而 III 类场地的调整系数则高于全国平均结果。相对于 II 类场地, I₁ 类场地的平均调整系数为 0.69, III 类场地的平均调整系数为 1.38。

表 3 50 年超越概率 10% 情况下, 基于 II 类场地的 PGA 调整系数

Table 3 PGA adjustment factors for Site Class II under 10% exceedance probability in 50 years

II 类场地基本地震动峰值加速度	场地类型					
	I ₁		II		III	
	五代图	本文	五代图	本文	五代图	本文
≤0.05g	0.80	0.69	1.00	1.00	1.30	1.41
0.10g	0.82	0.63	1.00	1.00	1.25	1.31
0.15g	0.83	0.62	1.00	1.00	1.15	1.32
0.20g	0.85	0.61	1.00	1.00	1.00	1.31
0.30g	0.95	0.63	1.00	1.00	1.00	1.38
≥0.40g	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.49

5 结论与讨论

本文基于概率地震危险性分析方法, 结合新疆地区场地剪切波速分布和场地条件特征, 研究了场地条件对区域地震危险性的影响, 给出了新疆地区考虑场地条件的场地影响调整系数。主要结论如下:

1) 使用 OpenQuake 软件对新疆地区进行概率地震危险性分析结果与第五代区划图的危险性空间分布基本一致, 阿尔泰山、天山和昆仑山脉等地的地震危险性明显高于其他地区, PGA 及 Sa 值最大值出现在帕米尔高原南部; 塔里木盆地和准噶尔盆地的地震危险性则低于周围地区。受覆盖土层影响, PGA 以及 0.2 s、0.5 s 和 1 s 的反应谱加速度值在塔里木和准噶尔盆地等土层较软地区有明显放大作用, 放大效果随着场地剪切波速的降低而增强, 反应谱加速度值在周期为 0.5 s 时场地放大效应最明显; 而在阿尔泰山、天山和昆仑山脉等硬岩地区, 相同概率水平的地震动参数有明显的降低, 这些结果一定程度上体现了局部场地条件对地震动参数的影响特征。

2) 以基岩 I₁ 类场地为参考, 给出了新疆地区考虑局部场地条件的场地影响调整系数。对于不同超越概率水平, II、III 类场地的地震动调整系数几乎相同, 这表明场地调整系数受区域地震危险性水平的影响较小。在相同超越概率水平下, II 类和 III 类场地反应谱加速度

度调整系数呈现出随周期的增大先增大后减小的规律，且均在周期为 0.4 s 时调整系数为最大。对于基本设防地震动（50 年超越概率为 10%），该最大值分别为 1.87 和 3.15。总体来看，III 类场地相对于基岩 I₁ 类场地的地震危险性放大效应较 II 类场地更显著。

3) 将本文计算的基本设防地震动的 PGA 调整系数转换为以 II 类场地作为参考，并按照区划图的地震动分区进行分组，给出各类场地进一步考虑非线性效应的 PGA 调整系数。与五代图的平均调整系数相比，新疆地区场地影响调整系数在 I₁ 类场地偏小，而 III 类场地的调整系数则偏大。本文结果表明，对于新疆地区，I₁ 类场地采用全国平均的场地调整结果可能偏保守，而 III 类场地采用全国平均结果则可能导致设防地震动的低估。

本研究揭示了新疆地区场地条件对地震危险性的区域影响和周期依赖性，但在考虑场地剪切波速分布和区域地震危险性时，由于地形地貌、地质图数据精度的限制，采用 V_{S30} 混合经验模型给出的新疆地区剪切波速估计结果，具有一定不确定性，会影响地震危险性结果。此外，由于研究范围仅限于新疆地区，一些特殊的区域场地特征（如特殊地质构造等）可能未能充分覆盖。因此，本文的结论主要适用于新疆地区，若将其推广到其他地区，需进一步验证。受限于新疆地区深部钻孔 (>100 m) 和剪切波速测井数据稀缺，本研究暂未考虑非线性效应和盆地放大效应影响，后续针对该问题需进一步深入研究。

参 考 文 献

- 薄景山, 李琪, 齐文浩, 王玉婷, 赵鑫龙, 张毅毅. 2021. 场地条件对地震动和震害影响的研究进展与建议[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 51(5): 1295-1305.
- Bo J S, Li Q, Qi W H, Wang R T, Zhao X L, Zhang Y Y. 2021. Research progress and discussion of site condition effect on ground motion and earthquake damage[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 51(5): 1295-1305(in Chinese).
- 陈兰生, 冀昆, 温瑞智, 周宝峰. 2021. 考虑场地放大的全国地震危险分析[J]. 地震工程与工程振动, 41(6): 177-185.
- Chen L S, Ji K, Wen R Z, Zhou B F. 2021. Seismic hazard analysis for China considering site amplification effect[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 41(6): 177-185(in Chinese).
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (12): 1020-1030+1057.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, Yang X P, Min W, Chu Q Z. 2002. Basic characteristics of active tectonics in China[J]. *Science in China(Series D: Earth Sciences)*, (12): 1020-1030+1057(in Chinese).
- 胡聿贤, 孙平善, 章在墉, 田启文. 1980. 场地条件对震害和地震动的影响[J]. 地震工程与工程振动, (0): 34-41.
- Hu Y X, Sun P S, Zhang Z Y, Tian Q W. 1980. Effects of site conditions on earthquake damage and ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, (0): 34-41 (in Chinese).
- 李昌珑, 吴健, 徐伟进, 高孟潭. 2016. 全国地震模型 (GEM) 研究进展综述及应用前景展望[J]. 震灾防御技术, 11(3): 582-591.
- Li C L, Wu J, Xu W J, Gao M T. 2016. Review and prospect of the global earthquake model (GEM)[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 11(3): 582-591(in Chinese).
- 潘华, 高孟潭, 谢富仁. 2013. 新版地震区划图地震活动性模型与参数确定[J]. 震灾防御技术, 8(1): 11-23.
- Pan H, Gao M T, Xie F R. 2013. The earthquake activity model and seismicity parameters in the new seismic hazard map of China[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 8(1): 11-23 (in Chinese).
- 俞言祥, 李山有, 肖亮. 2013. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J]. 震灾防御技术, 8(1): 24-33.
- Yu Y X, Li S Y, Xiao L. 2013. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 8(1): 24-33 (in Chinese).

- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (S1): 12-20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, Ma J, Gan W J, Min W, Mao F Y, Wang Q. 2003. Strong earthquakes and active blocks in mainland China[J]. *Science in China(Series D: Earth Sciences)*, (S1): 12-20(in Chinese).
- 朱传庆, 杨书江, 李同彬, 史丽艳. 2008. 塔里木盆地主要断裂的地球物理特征及与天然地震的关系[J]. 地球物理学进展, 23(6): 1685-1691.
- Zhu C Q, Yang S J, Li T B, Shi L Y. 2008. Geophysical characters of major faults in the Tarim Basin and the relationships with earthquakes[J]. *Progress in geophysics*, 23(6): 1658-1691.
- 周本刚, 陈国星, 高战武, 周庆, 李姜一. 2013. 新地震区划图潜在震源区划分的主要技术特色[J]. 震灾防御技术, 8(2): 113-124.
- Zhou B G, Chen G X, Gao Z W, Zhou Q, Li J Y. 2013. The technical highlights in identifying the potential seismic sources for the update of national seismic zoning map of China[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 8(2): 113-124(in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2016. GB 1830—2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社: 240.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. 2016. *GB 1830—2015 Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China*[S]. Beijing: Standards Press of China: 240(in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2010. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 1-510.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2010. *GB 50011—2010 Code for Seismic Design of Buildings*[S]. Beijing: China Architecture and Building Press: 1-510(in Chinese).
- Ahdi S K, Kwak D Y, Ancheta T D, Contreras V, Kishida T, Kwok A O, Mazzoni S, Ruz F, Stewart J P. 2022. Site parameters applied in NGA-Sub database[J]. *Earthquake Spectra*, 38(1): 494-520.
- Allen T I, Griffin J D, Leonard M, Clark D J, Ghasemi H. 2020. The 2018 national seismic hazard assessment of Australia: Quantifying hazard changes and model uncertainties[J]. *Earthquake Spectra*, 36(S1): 5-43.
- Bindi D, Abdurakhmatov K, Parolai S, Mucciarelli M, Grünthal G, Ischuk A, Mikhailova N, Zschau J. 2012. Seismic hazard assessment in Central Asia: Outcomes from a site approach[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 37: 84-91.
- Bindi D, Cotton F, Kotha S R, Bosse C, Stromeyer, Grünthal G. 2017. Application-driven ground motion prediction equation for seismic hazard assessments in non-cratonic moderate-seismicity areas[J]. *Journal of Seismology*, 21(5), 1201-1218.
- Cornell C A. 1968. Engineering seismic risk analysis[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5): 1583-1606.
- Dravinski M, Ding G, Biswas N N. 2003. Site amplification factor in Anchorage, Alaska based on long period microtremors[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 7(4): 555-571.
- Dangkua D T, Rong Y F, Magistrale H. 2018. Evaluation of NGA-West2 and Chinese ground-motion prediction equations for developing seismic hazard maps of Mainland China[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108: 2422-2443.
- Gutenberg B, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4): 185-188.
- GITHUB. 2025. hazardlib [EB/OL]. [2025-02-25]. <https://github.com/gem/oq-engine/tree/master/openquake/hazardlib>.

- Rong Y F, Xu X W, Cheng J, Chen G H, Magistrale H, Shen Z K. 2020. A probabilistic seismic hazard model for mainland China[J]. *Earthquake Spectra*, 36(1_suppl): 181-209.
- Silva V, Crowley H, Pagani M, Pinho R. 2012. Development and application of OpenQuake, an open source software for seismic risk assessment[C]. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Paper No.4923.
- Wood H D. 1908. Distribution of apparent intensity in San Francisco in the California earthquake of April 18, 1906 [R]. Washington D C: Carnegie Institution of Washington Publication: 220-245.
- Xie J J, Li K W, Li X J, An Z, Wang P F. 2023. Vs₃₀-based relationship for Chinese site classification[J]. *Engineering Geology*, 324: 107253.

《地震学报》最新录用