



地球科学

Earth Science

ISSN 1000-2383, CN 42-1874/P

《地球科学》网络首发论文

题目：考虑震源效应、路径效应和场地效应空间变化的日本俯冲带地区非遍历地震动模型

作者：侯瑞彬，冀昆，刘名吉，王宏伟，任叶飞，赵兴权

网络首发日期：2025-09-11

引用格式：侯瑞彬，冀昆，刘名吉，王宏伟，任叶飞，赵兴权. 考虑震源效应、路径效应和场地效应空间变化的日本俯冲带地区非遍历地震动模型[J/OL]. 地球科学. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20250910.1602.017>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.3799/dqkx.2025.183

考虑震源效应、路径效应和场地效应空间变化的日本俯冲带地区非遍历地震动模型

侯瑞彬^{1,2,3}, 冀昆⁴, 刘名吉^{1,2}, 王宏伟^{1,2}, 任叶飞^{1,2}, 赵兴权⁵

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与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. 西华大学建筑与土木工程学院, 四川 成都 610039; 4. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京, 210024; 5. 山东建筑大学建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 山东 济南, 250101)

摘要: 地震动模型是地震危险性分析的重要组成部分, 基于遍历性假定的地震动模型采用地震动影响因素的物理表征参数建立函数化模型实现地震动预测, 在表征参数相同的情况下, 忽视了震源特性、传播介质和场地条件的空间变化特性, 导致设定“震源-路径-场地”系统的预测结果出现较大偏差, 是模型预测精度难以提升的原因之一。本文在遍历性地震动预测方程的基础上, 引入空间建模方法, 通过将研究区域剖分为地理单元格评估地震动衰减的空间变化, 并将震源效应、路径衰减和场地效应的空间变化过程假定为高斯随机过程, 选用指数核函数刻画三者的变化规律, 从而搭建非遍历地震动预测体系, 实现设定“震源-路径-场地”系统的地震动预测。利用日本俯冲带地区的5957条观测记录, 建立非遍历地震动模型, 利用贝叶斯回归得到非遍历地震动效应的结果。研究结果表明, 引入非遍历地震动效应项后, 模型能更精准地预测震源效应、路径衰减效应和场地效应的空间变化特征; 模型随机误差显著下降, 事件间标准差和场地间标准差的降低最大均接近40%, 总标准差的降低最大达26%; 在记录数量较稀疏的地区, 模型的认知标准差较大。研究成果可为我国非遍历地震动模型的构建提供参考。

关键词: 地震动模型; 非遍历假定; 地震动效应; 随机误差; 认知不确定性

中图分类号: P315

Nonergodic ground motion modeling for the subduction zone in Japan accounting for spatial variation in source, path, and site effects

Ruibin Hou^{1,2,3}, Kun Ji⁴, Mingji Liu^{1,2}, Hongwei Wang^{1,2}, Yefei Ren^{1,2}, John X. Zhao⁵

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin Heilongjiang, 150080; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin Heilongjiang, 150080; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039; 4. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu, 210024; 5. Key Laboratory of Building Structural Retrofitting and Underground Space Engineering, Ministry of Education, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong, 250101)

Abstract: Ground motion models (GMMs) are a critical component of seismic hazard analysis. Ergodic assumption is employed by typical GMMs for ground motion prediction using a number of physically meaningful functions and parameters

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2024D07); 四川省自然科学基金青年基金项目(2025ZNSFSC1283); 国家自然科学基金项目面上项目(52378506); 建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室开放基金项目(MEKL202311)。

作者简介: 侯瑞彬(1990—), 男, 讲师, 博士, 主要从事地震动特性分析与预测研究; 赵兴权(1958—), 男, 教授, 博士, 主要从事地震动衰减特性分析与预测研究, E-mail: johnzhao1000@126.com。

for source, path and site effects. If the parameters are identical, the prediction by these models would neglect the spatial variation of source characteristics, propagation media quality, and site conditions. This simplification can lead to significant biases for a given "source-path-site" system and become one of the main reasons limiting prediction accuracy. To address this limitation, this study further introduces spatial modeling techniques based on the typical ground motion prediction equations. The spatial variation of the attenuation in path effects is evaluated by cutting the study area into geographic cells. The spatial variation of source effects, path effects, and site effects is modeled as Gaussian stochastic processes and an exponential kernel function is selected to characterize the spatial variation discipline. This framework is capable of predicting ground motions for specific source-path-site system. Using 5957 ground motion recordings from the shallow crustal earthquakes in Japanese subduction zone, a nonergodic ground motion model is developed. Bayesian inference is employed to estimate the non-ergodic ground motion terms. The results show that incorporating nonergodic effects allows the model to more accurately capture the spatially non-uniform variation character of source effect, ground motion attenuation and site effect. Compared to ergodic models, the nonergodic model achieves significant reductions in between-event and between-site standard deviations of up to 40%, and a maximum reduction in total standard deviation of 26%. In regions with sparse recordings, the epistemic uncertainty remains relatively large. These findings provide valuable insights for the development of nonergodic ground motion models in China.

Keywords: Ground motion model; Nonergodic assumption; Seismic effects; Random error; Epistemic uncertainty

1. 引言

地震动是断层破裂、地震波传播和近地表局部场地反应三个物理过程的复杂产物(王海云, 2014; 王宏伟等, 2017; Anderson 和 Hough, 1984; Boore, 2003), 震源特性、传播路径特性、局部场地条件均会对地震动强度产生显著影响。震源特性包括地震释放能量、破裂断层几何特征、滑动方式与过程等, 其数理表征参数主要为地震震级、断层机制; 传播路径特性包括地壳介质品质、地震波在地壳内传播路径, 通常采用断层距作为传播路径特性的典型表征参数; 而局部场地条件包括局部场地波速结构、场地土层厚度、场地土体动力特性等, 其表征参数主要为场地土层等效剪切波速、 V_{S30} 等(肖亮和俞言祥, 2022)。受孕震环境区域差异变化等因素的影响, 震源特性也呈现出一定的区域差异和空间变化, 导致相同震级地震事件所产生的强震动存在显著差异, 比如: Xu 等(2020)通过对比分析我国南北地震带上 M_w 介于 6.0 与 6.2 之间的 6 次地震的强震动记录, 发现这些地震事件的震源效应之间存在显著差异。地壳波速结构和介质品质在空间中的变化使不同地震记录在地壳内经历不同反射、折射路径, 因此, 即便在断层距相同的情况下, 空间中不同区域、不同辐射路径的强震动记录衰减特征也存在显著差异。比如: 赵翠萍等(2011)研究表明, 我国川西、川东、青藏高原东北缘等大尺度区域间的衰减率显著不同; Zhang 等(2024)指出, 川西龙门山断裂区、鲜水河断裂区、虎牙断裂区, 对地震动衰减的影响也显著不同。在局部场地土层波速结构相同或接近的情况下, 土体动力特性对地震动的放大也有一定贡献, 从而导致土层对地震动的放大系数呈现显著差别, 比如: Hou 等(2025)通过对比积石山地震黄土场地的放大系数和青藏高原场地的放大系数, 发现在 V_{S30} 相同的情况下, 黄土场地的放大作用更强。以上分析表明, 强地震动的影响因素复杂多样, 不仅与震级、断层距、场地等效剪切波速等有关, 仍与断裂特征、地壳结构、土体动力特性等复杂因素有关, 这些因素的区域性空间变化导致地震动呈现出显著区域差异。

地震动模型(也称地震动衰减关系、地震动预测方程)是实现地震动预测的关键手段, 是地震危险性分析的重要组成部分和重大工程地震动输入参数确定的主要依据(霍俊荣和胡聿贤, 1992;

肖亮和俞言祥, 2022; 朱景宝等, 2025; Cornell, 1968)。过往研究中, 通常针对某一构造类别地震建立大尺度区域的地震动模型, 比如: NGA-West2 项目建立的全球构造活跃地区地震动模型 (Bozorgnia 等, 2014)、NGA-Subduction 项目建立的全球俯冲带地区地震动模型 (Bozorgnia 等, 2022)。在我国《地震动参数区划图 (GB18306-2015)》编制过程中, 也将我国划分为中部强震区、华北强震区、青藏区、新疆区, 分区建立地震动衰减关系 (俞言祥, 2013), 四个分区均涵盖了大量活动断裂并覆盖了广阔的国土面积。这些模型采用矩震级、断层距、 V_{s30} 等参数表征地震动影响因素, 并假定在研究区域内, 对于任意“震源-路径-场地”系统所产生的地震动, 其强度值随震级大小、传播距离远近、场地软硬的变化关系为定值。因此, 在三者的表征参数均相同的情况下, 任意“震源-路径-场地”系统的地震动预测值均相同。Anderson 和 Brune (1999) 将此定义为遍历性 (ergodic) 假定。然而, 实际强地震动观测结果并不完全与遍历性假定吻合。以 2022 年芦山 M_s 6.1 级地震为例, 傅磊等 (2023) 发现, 同为我国 II 类场地的川西峡谷场地对大于 10Hz 的高频段放大效应显著, 而川东盆地深厚沉积场地对小于 5Hz 的低频震动放大作用明显。这与遍历性假定下同一类别场地具有相同场地放大系数预测结果存在不一致。可见, 基于遍历性假定的地震动模型仅评估了震级、断层距、场地条件等因素对地震动的一阶影响规律, 未充分考虑震源特性、传播介质特性和局部场地条件的区域性空间异质特性等对地震动的高阶影响, 是导致地震动模型预测结果出现显著偏差的重要原因, 也是模型预测精准度难以进一步提升的理论瓶颈。

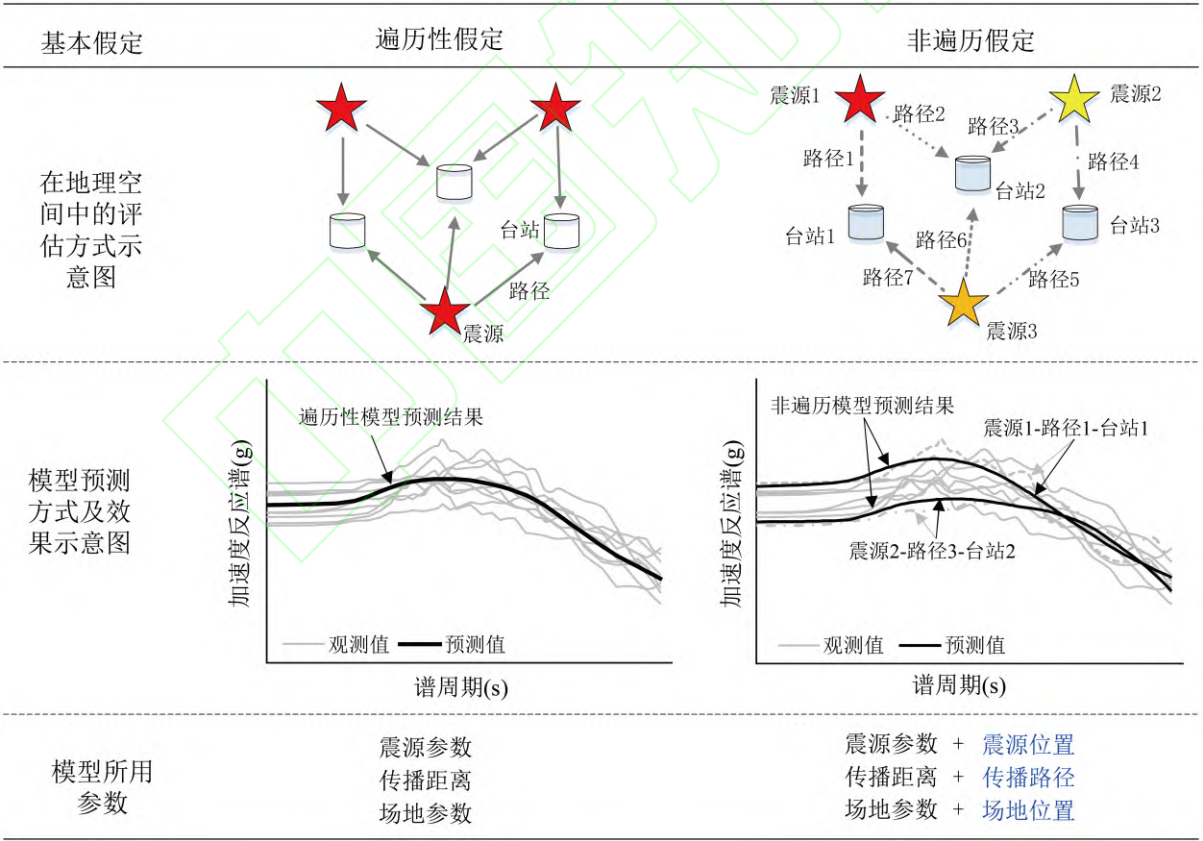


图 1 遍历性假定和非遍历假定对强震动的预测评估方式示意图

Figure 1 Illustration for the evaluation methods and prediction effects of strong ground motion based on ergodic and non-ergodic assumptions

近年来, 随着全球强地震动观测记录的不断增加, 强地震动区域性空间差异的评估逐渐被科研人员重视。比如: 近年有关地震动衰减关系的大型项目成果均引入了区域调整系数; Zhang 等 (2021)

针对我国川滇地区建立的区域地震动衰减关系。地震动是“震源-路径-场地”这一系统的复杂产物，由于地质构造等因素所存在的空间变化和区域差异特征，三者中任意因素在空间中的变化均可能导致地震动观测结果的变化。国外密集观测记录表明（Lin 等，2011；Parker 等，2022），对于某特定“震源-路径-场地”系统所产生的重复性强震动记录，其强度值与针对大尺度区域所建地震动模型预测值之间存在显著系统性偏差，这些记录的随机离散程度也比针对大尺度区域所建地震动模型的离散程度低。因此，构建基于非遍历假定的地震动模型，以实现特定“震源-路径-场地”系统的地震动预测，从而更精确地评估以上影响因素的区域性空间变化而导致的强震动变异，如图 1 所示，成为消除预测偏差、提高预测精度的有效方法。随着全球观测记录的不断丰富，过去十多年间，国际上关于非遍历地震动模型的研究也逐渐增多，比如：Landwehr 等（2016）提出通过将遍历性地震动模型的系数设置为空间变化系数，实现非遍历地震动效应的预测；国际著名工程地震专家 Abrahamson 等（2019）倡议，地震危险性分析中的地震动模型应从遍历性向非遍历假定迁移，并提出先建立傅里叶幅值谱非遍历地震动模型，再基于随机振动理论建立反应谱模型（Phung 和 Abrahamson，2022；Lavrentiadis 等，2023a），该方法充分利用了地震震级对傅里叶幅值谱谱形影响小这一特点，有利于利用中小地震建立非遍历地震动模型，并进一步外推至大震情景；Kuehn 等（2019）在 NGA-West2 模型中引入路径效应非遍历性，建立了部分非遍历地震动模型；Caramenti 等（2022）采用地理加权平均方法建立的非遍历地震动模型，也能够有效捕捉地震动的空间变化。这些研究均表明，非遍历地震动模型能够更清晰地表征地震动影响因素的区域特异性，从而实现更精准的预测。与机器学习模型主要依靠数据驱动相比，非遍历地震动模型在评估地震动时更关注其影响规律的特异性，物理含义更丰富。

自 2007 年以来，我国建设的强震动台站虽观测到了一定量的强震记录，但与国外台网相比，仍存在台站间距较大且空间分布不够均衡、台站场地资料较匮乏、大震记录数量仍不够丰富等不足（郭文轩等，2025），对非遍历地震动模型的构建起到一定束缚作用。即便如此，近年我国科研人员对地震动模型的研究也呈现出逐渐增多且更关注区域地震动模型的发展态势（胡进军等，2021；Hu 等，2025），但限于观测记录空间分布较稀疏等原因，目前对于非遍历地震动模型的研究仍很少。日本位于欧亚板块、太平洋板块和菲律宾板块的交界处，该地区俯冲构造复杂、地震频发，强震观测台网空间分布较均匀且密集，地震震源信息、场地钻孔等基础资料也较丰富，为非遍历地震动预测研究提供了良好条件。研究表明，基于日本地区浅地壳地震记录所建地震动模型，在我国西南地区的适用性较好（Lan 等，2019）；同时，日本与我国台湾同属俯冲带地区且具有相近的俯冲构造，研究表明，两地区在场地反应等方面具有相近的特性（Abrahamson 和 Gulerce，2022）。因此，基于日本强震记录的地震动模型研究可为我国非遍历地震动模型的建立提供参考。

基于此，本文将首先提出基于非遍历假定的地震动模型构建框架，给出其对特定“震源-路径-场地”系统地震动的预测原理，如图 1 所示，以充分反映地震动影响因素的空间变化所导致的强震动差异。然后，利用日本俯冲带地区的强震动记录，以 Hou 和 Zhao（2024）所建浅壳与上地幔地震遍历性地震动模型（后文简称为 HZ24 模型）为基础，通过引入震源效应、路径效应和场地效应的非遍历效应项，构建非遍历地震动模型，评估非遍历假定下三者预测结果的变化及对地震动预测的提升效果，得到模型关键参数，从而为我国非遍历地震动模型的构建提供依据和参考。

2. 基于非遍历假定的地震动预测体系

2.1 非遍历地震动模型基本框架

本文通过在传统地震动预测方程中引入与空间位置有关的非遍历效应项，实现非遍历地震动模型的构建及特定“震源-路径-场地”系统的预测。所建非遍历地震动模型的理论框架如下所示：

$$\ln(y) = \ln(y_{\text{erg}}) + \ln(y_{\text{nerg}}) + \varepsilon_T \quad (1a)$$

$$\ln(y_{\text{erg}}) = f_E(M, F_M) + f_P(R_{\text{rup}}) + f_S(V_{S30}) \quad (1b)$$

$$\ln(y_{\text{nerg}}) = \delta_{L2L}(\bar{x}_{\text{src}}, \bar{x}_{\text{src}}) + \delta_{P2P}(\bar{x}_{\text{cls}}, \bar{x}_{\text{site}}) + \delta_{S2S}(\bar{x}_{\text{site}}) \quad (1c)$$

式中， y 代表观测地震动水平分量的几何平均值，本文采用 PGA 和 0.05s、0.1s、0.2s、0.5s、1.0s、2.0s、4.0s 的加速度反应谱值作为地震动参数，其单位为重力加速度 g ； y_{erg} 、 y_{nerg} 分别代表遍历性效应项和非遍历性效应项预测值， ε_T 为预测总残差。遍历性效应项 y_{erg} 由地震动预测方程确定， $f_E(M, F_M)$ 、 $f_P(R_{\text{rup}})$ 和 $f_S(V_{S30})$ 分别代表遍历性震源项、路径项和场地项，三者分别为地震震级 M 和断层机制 F_M 、传播距离 R_{rup} 、场地周期 T_s 等参数的函数，用于表征研究区域内震源特性、传播介质、局部场地条件等因素对地震动的一阶影响规律。 $\delta_{L2L}(\bar{x}_{\text{src}}, \bar{x}_{\text{src}})$ 、 $\delta_{P2P}(\bar{x}_{\text{cls}}, \bar{x}_{\text{site}})$ 和 $\delta_{S2S}(\bar{x}_{\text{site}})$ 分别为非遍历震源项、非遍历路径项和非遍历场地项，三者分别为震中坐标 $\bar{x}_{\text{src}}$ 、传播路径 $(\bar{x}_{\text{cls}}, \bar{x}_{\text{site}})$ 和场地坐标 $\bar{x}_{\text{site}}$ 的函数。对于存在有限断层模型的地震事件，本文采用有限断层面上距离场址最近点的坐标 $\bar{x}_{\text{cls}}$ 得到传播路径矢量；对于不存在有限断层模型的地震事件，则采用震中坐标 $\bar{x}_{\text{src}}$ 进行替代。

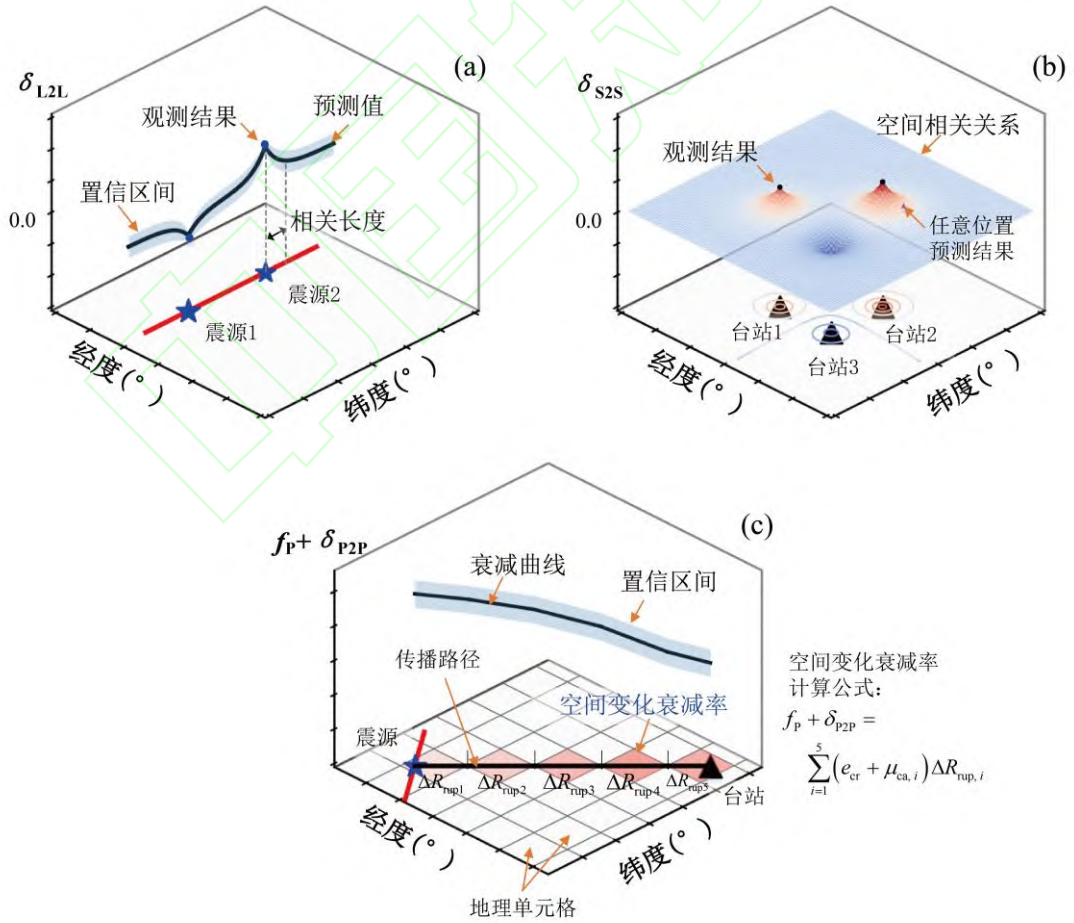


图2 本文地震动模型中 (a) 非遍历震源项、(b) 非遍历场地项和 (c) 非遍历场地项的空间变化模式
Figure 2 Spatial variation mode of (a) the nonergodic event term, (b) the nonergodic site term and (c) the nonergodic path

非遍历效应项与遍历性效应项在表征地震动效应时存在显著不同，用于反映震源特性、传播介质和场地条件随破裂位置、波动路径、场址的变化而引起的地震动系统性空间差异 (Lavrentiadis 等, 2023a)，可由震源效应、路径效应和场地效应的重复观测结果以及观测结果之间的空间相关关系得到，三者在地理空间中的变化模式和预测原理如图 2 所示。本文假定非遍历效应项 δ_{L2L} 、 δ_{P2P} 和 δ_{S2S} 均服从高斯分布，采用高斯随机过程约束 δ_{L2L} 、 δ_{P2P} 和 δ_{S2S} 在地理空间中的变化规律，并采用地质统计学的指数函数作为高斯过程模型的核函数 (kernel function)，表征非遍历效应项中震源对、台站对之间的空间相关关系，如图 2 (a) 和 2 (b) 所示。此空间相关关系由超参数设定，从而控制核函数形状及空间变化尺度。本文的超参数分为两种，一种是相关长度 (correlation length)，主要用于表征研究区域内地震动效应空间相关性随距离衰减的速度，相关长度越大，相关性的衰减越慢，这个参数与陈鲲等 (2020) 研究中所用半变异函数变程值的定义类似；另一种是非遍历效应的过程方差，该方差代表地震动效应的最大变异幅度，可根据该方差和观测点位置计算任意位置的预测不确定性。由于该不确定性与观测点位置有关，因此，将这部分不确定性认定为认知不确定性。超参数的值可由强震记录中临近震源或临近场地的反应量，通过高斯过程回归确定。采用图 2 (c) 所示方案将研究区域切分为多个单元格，同时，赋予各单元格不同的衰减系数并采用高斯随机过程约束相邻单元格衰减系数的变化趋势，根据传播路径矢量 $(\bar{x}_{cls}, \bar{x}_{site})$ 在各单元格内的长度估计各单元格的衰减系数，从而精细化表征地壳速度结构及介质品质的空间变化，实现特定传播路径地震动衰减的估计，如图 2 (c) 所示。

2.2 遍历性效应项

遍历性效应项是非遍历地震动模型的基本骨架，表征了研究区域内震源特性、传播距离及场地条件对地震动的基本影响规律，是各影响因素表征参数的数理函数，可通过随机效应算法回归分析确定。在表征参数不变的情况下，遍历性效应项与震源、场地的空间位置无关，不具有空间变化性。作为基本骨架，遍历性效应项能够起到约束所建非遍历模型预测结果合理、保证所建模型具有可靠外推能力的作用。

本文在后续分析中，将选取 HZ24 模型中已标定完成的效应项作为本文所建模型的遍历性效应项，从而适配所用观测记录。该模型中，震源效应采用矩震级分段函数；路径效应以断层距为参数，包含几何衰减项、非弹性衰减项和火山区附加非弹性衰减项；场地效应以场地周期为表征参数，采用简化单自由度体系传递函数实现场地共振效应的预测。该模型的具体函数表达式及其计算程序请参见 Hou 和 Zhao (2024)，本文不再赘述。

2.3 非遍历效应项

采用高斯过程表征非遍历震源项、非遍历路径项和非遍历场地项在空间中的随机变化过程。其中，非遍历震源项的函数表达式如下：

$$\delta_{L2L} \bar{x}_{src} \sim \mathcal{GP} \ 0, \kappa_E \bar{x}_{src}, \bar{x}'_{src} \quad (2a)$$

$$\kappa_E \bar{x}_{src}, \bar{x}'_{src} = \omega_E^2 \exp \left(- \frac{\|\bar{x}_{src} - \bar{x}'_{src}\|}{l_E} \right) \quad (2b)$$

式中， $\mathcal{GP}$ 代表高斯过程，式 (2a) 意味着 δ_{L2L} 服从均值为 0、协方差为 $\kappa_E \bar{x}_{src}, \bar{x}'_{src}$ 的多元高斯分布。在对公式 (2a) 中非遍历震源项进行回归训练的过程中，本文以 HZ24 模型的事件间残差为基础数

据，因此，式（2a）中高斯过程的均值取为 0。 $\kappa_E \vec{x}_{src}, \vec{x}'_{src}$ 为高斯过程的核函数（或称为协方差函数），用于表征任意两震源效应之间的空间相关关系，即：震中为 $\vec{x}_{src}$ 的地震与震中为 $\vec{x}'_{src}$ 的地震事件所产生的震源效应之间的相似程度。本文采用地统计学中常用的指数核函数表征此空间相关关系，如式（2b）所示。式中 $\|\cdot\|$ 为距离二范式计算符号，用于得到 $\vec{x}_{src}$ 与 $\vec{x}'_{src}$ 之间的距离； l_E 和 ω_E 均为非遍历震源项的超参数， l_E 为非遍历震源项的相关长度， ω_E^2 为非遍历震源项的过程方差，二者的值均由高斯过程回归得到。公式（2b）表明， κ_E 是一个空间变化函数，两地震事件相距很远时，其值接近零；而相距很近时，其值接近 ω_E^2 。显然，协方差 κ_E 的空间变化将导致非遍历震源效应预测均值的不确定性具有空间变化特征，在距观测事件较近的位置，较大的协方差将带来更小的不确定性；在较远位置，将具有更大的不确定性。由于这种不确定性与位置、观测地震事件数量等因素有关，因此，将这部分不确定性归入认知不确定性，作为模型的认知标准差。

通常情况下，场地与震源在地理空间中均表征为一个点。因此，采用与非遍历震源项相同的方法建立非遍历场地项 δ_{s2s} ，其函数表达式如下所示：

$$\delta_{s2s}(\vec{x}_{site}) \sim \mathcal{GP}(0, \kappa_s(\vec{x}_{site}, \vec{x}'_{site})) \quad (3a)$$

$$\kappa_s \vec{x}_{site}, \vec{x}'_{site} = \omega_s^2 \exp\left(-\frac{\|\vec{x}_{site} - \vec{x}'_{site}\|}{l_s}\right) \quad (3b)$$

式中符号的含义与式（2）类似，非遍历场地项 δ_{s2s} 服从均值为 0、协方差为 $\kappa_s \vec{x}_{site}, \vec{x}'_{site}$ 的高斯分布。由于非遍历场地项是根据遍历性模型场地间残差得到，该项是对遍历性模型预测结果在空间中的调整，因此，在式（3a）中将 δ_{s2s} 的均值设为零，作为预测先验。式 3（b）中， $\kappa_s \vec{x}_{site}, \vec{x}'_{site}$ 为高斯过程的核函数，该式与 Jayaram 和 Baker（2009）、陈鲲等（2020）的半变异函数类似，用于表征坐标分别为 $\vec{x}_{site}$ 和 $\vec{x}'_{site}$ 的两场地反应间的空间相关关系。 l_s 为非遍历场地项的相关长度，当两场地间的距离大于 l_s 时， δ_{s2s} 之间的相关性很弱，协方差 κ_s 很小。理论上讲，对于距观测台站很远的场地，其非遍历场地效应调整系数 δ_{s2s} 难以根据观测值估计，因此，其预测值应与遍历性预测结果接近，非遍历场地效应预测值接近于零，认知标准差接近 ω_s ；而在距观测记录很近的位置，非遍历场地项预测均值应与观测记录的场地间残差接近，其认知标准差也将远低于 ω_s 。

对于非遍历路径项，本文通过将研究区域在 UTM 坐标系内切分为若干单元格并回归确定各单元格的衰减系数，来建立非遍历路径项。在根据各记录传播路径在各单元格内的传播距离，实现空间变化路径效应的预测。非遍历路径项 δ_{p2p} 的函数表达式为：

$$\delta_{p2p}(\vec{x}_{cls}, \vec{x}_{site}) = \delta_{ca} \Delta R_{rup} \quad (4a)$$

$$\delta_{ca} \sim \mathcal{GP}(0, \kappa_{Att} \vec{x}_c, \vec{x}'_c) \quad (4b)$$

$$\kappa_{Att} \vec{x}_c, \vec{x}'_c = \omega_{Att}^2 \exp\left(-\frac{\|\vec{x}_c - \vec{x}'_c\|}{l_{Att}}\right) \quad (4c)$$

式（4a）中， ΔR_{rup} 为强震动记录传播路径在单元格内的断层距，即：震源坐标 $\vec{x}_{cls}$ 和场地坐标 $\vec{x}_{site}$ 组成的矢量路径在单元格内的投影长度； δ_{ca} 为该单元格非弹性衰减调整系数，在回归分析确定此系数的值后，该单元格的非弹性衰减系数即为 δ_{ca} 与遍历性非弹性衰减系数之和。本文仍采用高斯过程约束 δ_{ca} 的空间变化模式和空间相关性，如式（4b）和（4c）所示， $\vec{x}_c$ 为单元格中心坐标，用于代表单

元格的空间位置。采用指数核函数表征不同单元格 δ_{ca} 的空间关系； l_{Att} 和 ω_{Att} 均为模型超参数，前者代表 δ_{ca} 的相关长度，后者代表无观测记录情况下，单元格非弹性衰减调整系数的认知标准差。对于观测记录较丰富的单元格，由于观测记录的先验引导作用， δ_{ca} 的均值将不等于 0；单元格相距较近时，二者间的协方差 κ_{Att} 也更大。图 3 (c) 为路径衰减系数调整值在地理空间内的分布特征，不同地理单元格的衰减系数调整值存在差异，对地震动衰减的贡献也不同，由此所得预测结果理应更精确。

2.4 模型回归分析方法

在建立非遍历地震动模型时，主要包含两个基本步骤。首先，建立遍历性效应项，可利用随机效应算法回归分析得到。然后，再利用遍历性效应项的预测残差，进行贝叶斯建模和预测，利用高斯过程回归实现。在高斯过程回归分析过程中，结合模型超参数的物理含义设定其先验值或其先验分布，采用马尔科夫蒙特卡洛法求得各参数的后验分布。该过程可由 Stan 程序完成，从而得到模型超参数值及地震动效应的空间函数，实现震源效应、路径效应和场地效应空间变化的估计。

本文以 HZ24 模型为基础，根据此模型系数确定强震动记录中的遍历性效应，并利用随机效应算法将总残差分解为事件间残差和事件内残差，再将事件内残差分解为场地间残差和场地内残差。其中，事件间残差、场地间残差和场地内残差分别代表遍历性假定下地震事件的随机误差、观测场地的随机误差和传播路径的随机误差。进一步借助高斯过程回归算法，采用公式 (2)、(3) 和 (4) 中所示函数，分别对事件间残差、场地间残差和场地内残差进行训练，得到不同谱周期的模型超参数值。在此过程中，参考 Lavrentiadis 等 (2023b) 研究，假定超参数 l_E 、 l_S 和 l_{Att} 服从逆伽马分布， ω_E 、 ω_S 和 ω_{Att} 服从指数分布，作为各超参数的先验分布。

2.5 模型预测方法

与本文所构建非遍历地震动模型框架相对应，模型预测也包含两个基本部分，即：遍历性地震动效应的预测和非遍历地震动效应的预测。前者根据遍历性效应的函数表达式计算得到，为参数化计算模块，此部分较简单且易于实现，本文不再赘述。对于后者，由于高斯过程回归是一种非参数贝叶斯方法 (Rasmussen 和 Williams, 2006)，其回归结果包含观测位置处观测值的后验分布以及代表观测数据空间关系的核函数。因此，若要得到空间中任意位置的非遍历效应预测结果，需通过构建观测位置与预测位置之间的联合分布，根据此联合分布确定预测位置的预测均值和认知不确定。

对于非遍历震源项，根据联合分布得到任意位置预测均值和预测标准差的函数表达式，如下：

$$\mu_{L2L} \vec{x}_{src}^* = \kappa_E \vec{x}_{src}, \vec{x}_{src}^* \kappa_E \vec{x}_{src}, \vec{x}_{src}^{-1} \delta_{L2L} \vec{x}_{src} \quad (5a)$$

$$\phi_{L2L}^2 = \kappa_E \vec{x}_{src}, \vec{x}_{src}^* - \kappa_E \vec{x}_{src}, \vec{x}_{src}^* \kappa_E \vec{x}_{src}, \vec{x}_{src}^{-1} \kappa_E \vec{x}_{src}, \vec{x}_{src}^* \quad (5b)$$

式中，符号“*”代表未知位置。 $\kappa_E \vec{x}_{src}, \vec{x}_{src}^*$ 为已知位置 $\vec{x}_{src}$ 处非遍历震源效应项与未知位置 $\vec{x}_{src}^*$ 处非遍历项之间的协方差，粗体代表多组位置之间组成的协方差矩阵，可根据公式 (2b) 计算得到； $\kappa_E \vec{x}_{src}, \vec{x}_{src}$ 为所有已知震中位置 $\vec{x}_{src}$ 处非遍历地震动效应之间的协方差矩阵； $\delta_{L2L} \vec{x}_{src}$ 为高斯过程回归的输出，代表已知震中 $\vec{x}_{src}$ 处非遍历震源效应的预测均值。

对于非遍历场地项，其预测表达式与非遍历震源项类似，如下：

$$\mu_{S2S} \vec{x}_{site}^* = \kappa_S \vec{x}_{site}, \vec{x}_{site}^* \kappa_S \vec{x}_{site}, \vec{x}_{site}^{-1} \delta_{S2S} \vec{x}_{site} \quad (6a)$$

$$\phi_{S2S}^2 = \kappa_S \vec{x}_{site}, \vec{x}_{site}^* - \kappa_S \vec{x}_{site}, \vec{x}_{site}^* \kappa_S \vec{x}_{site}, \vec{x}_{site}^{-1} \kappa_S \vec{x}_{site}, \vec{x}_{site}^* \quad (6b)$$

式中，符号所代表的含义与公式（5）相近，仅需将非遍历场地项对应超参数值代入，即可求得任意位置的场地效应空间调整值。

对于非遍历路径效应项，预测表达式为非弹性衰减调整系数的结果，如下所示：

$$\mu_{ca} \vec{x}_c^* = \mathbf{K}_{Att} \vec{x}_c, \vec{x}_c^*{}^T \mathbf{K}_{Att} \vec{x}_c, \vec{x}_c^{-1} \delta_{ca} \vec{x}_c \quad (7a)$$

$$\phi_{ca}^2 = \mathbf{K}_{Att} \vec{x}_c, \vec{x}_c^* - \mathbf{K}_{Att} \vec{x}_c, \vec{x}_c^*{}^T \mathbf{K}_{Att} \vec{x}_c, \vec{x}_c^{-1} \mathbf{K}_{Att} \vec{x}_c, \vec{x}_c^* \quad (7b)$$

式中，符号所代表的含义同前。但必须指出的是，对于任意一条记录，其路径效应的调整结果是非弹性衰减调整系数预测值 μ_{ca} 与单元格传播距离的乘积，如公式（4a）所示。

需要指出的是，公式（5）、（6）、（7）分别用于预测空间中任意位置的非遍历震源、非遍历场地和非遍历衰减调整，与公式（2）、（3）、（4）回归得到的非遍历效应项结果有所不同。后者是根据观测位置处遍历性模型残差确定观测位置处非遍历效应调整值及其空间关系，而前者则以此为基础，进一步预测任意位置的非遍历效应值。

2.6 模型预测不确定性

对于遍历性地震动模型，模型残差包含事件间残差 δB_e 和事件内残差 δW_{es} ，二者分别服从均值为零、标准差为 τ 的正态分布和均值为零、标准差为 ϕ 的正态分布，由此计算得到的总随机标准差为：

$$\phi_{erg} = \sqrt{\tau^2 + \phi^2} \quad (8)$$

将事件内残差进一步分解为场地间残差和场地内残差后，假定二者分别服从均值为零、标准差为 τ_s 和均值为零、标准差为 ϕ_{ws} 的正态分布，则模型标准差仍满足以下关系：

$$\phi = \sqrt{\tau_s^2 + \phi_{ws}^2} \quad (9a)$$

$$\phi_{erg} = \sqrt{\tau^2 + \tau_s^2 + \phi_{ws}^2} \quad (9b)$$

由于非遍历震源项 δ_{L2L} 、非遍历场地项 δ_{s2s} 和非遍历路径项 δ_{p2p} 的引入，非遍历模型的随机标准差将不同于遍历性模型。对于震源效应，在移除非遍历震源效应预测值后的剩余误差为随机误差，其标准差为 τ_0 ；对于场地效应部分，剩余误差的随机标准差为 τ_{s0} ；而路径效应剩余误差的随机标准差为 ϕ_{ws0} 。因此，非遍历效应项的随机标准差为：

$$\phi_{nErg} = \sqrt{\tau_0^2 + \tau_{s0}^2 + \phi_{ws0}^2} \quad (10)$$

本文所建非遍历地震动模型不确定性包括两部分，即：随机不确定性和认知不确定性。其中，随机不确定性由观测记录中震源效应、路径效应和场地效应的随机误差引起，根据各部分残差按照公式（8）至（10）计算得到；另一部分认知不确定性主要表征地震动记录在地理空间中非均衡分布所导致的预测不确定性。通常，预测位置离观测位置越近，二者的非遍历地震动效应之间的协方差越大，认知不确定性越小；反之，认知不确定性越大。此外，在采用高斯过程回归得到预测结果时，观测记录数量对预测不确定性的影响也被融入其中。可见，模型的认知标准差也具有空间变化性，由公式 5（b）、6（b）和 7（b）可分别计算得到空间中任意预测位置的认知标准差。在开展地震危险性分析时，认知标准差不可忽略，尤其是在观测记录稀缺以及距离观测点较远的位置，应与公式（10）中的随机标准差联合得到模型不确定性。理论上讲，遍历性地震动模型的总标准差应与非遍历地震动模型中观测记录稀缺区域的总标准差接近。

3 在日本俯冲带地区的应用与验证

3.1 强震动数据集

日本俯冲带地区构造环境复杂，考虑到地震构造对地震动强度的影响，Zhao 等（2015）按照震源深度与俯冲板深度之间的位置关系、断层破裂面与俯冲板界面之间的几何关系以及断层机制，将该地区的地震分为浅壳地震、上地幔地震、俯冲板间地震和俯冲板内地震。鉴于我国大陆地震为浅壳地震，本文选用日本俯冲带地区的浅壳地震作为研究对象。同时，为增大记录数量以保证所得结果的可靠性且考虑到上地幔地震与浅壳地震在场地效应方面的相似性，本文仍选用了上地幔地震观测记录，但在分析观测记录衰减特性时，未使用上地幔地震观测记录。数据集中共包含 117 次地震事件，地震震源深度均未超过 70km，矩震级均不小于 4.9 级，其矩震级随断层顶部深度的分布如图 3（a）所示。数据集中的强震动记录来自于 1004 个观测台站，均为日本 KiK-net 和 K-NET 台网的观测记录，记录数量为 5957 条，所有记录的断层距均未超过 283km。对于矩震级较小的地震事件，其观测记录的最大断层距也较小，如图 3（b）所示。观测台站所在场地均存在钻孔剖面信息，用于计算场地参数，在遍历性地震动模型中，采用场地基本周期 T_s 作为场地参数。

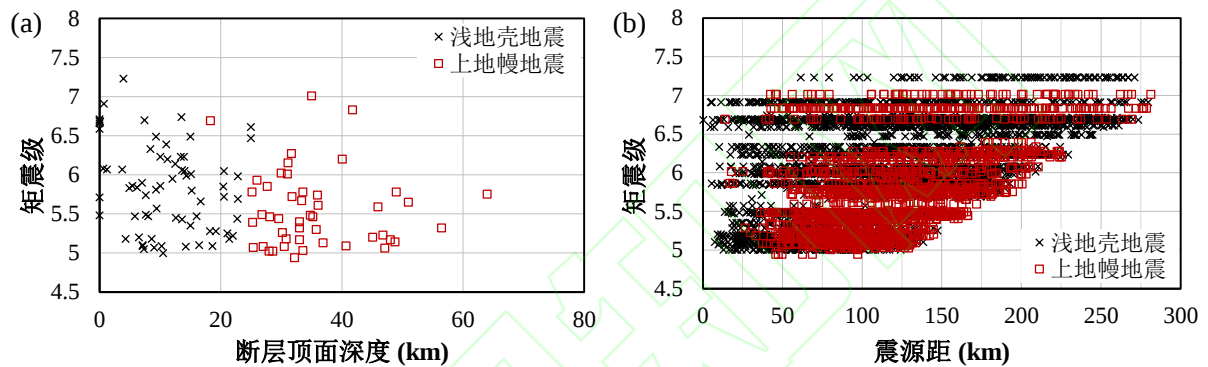


图 3 数据集中 (a) 地震事件矩震级随断层顶部深度的分布和 (b) 矩震级随强震记录震源距的分布
Figure 3 Distribution of (a) moment magnitude versus fault-top depth for the events and (b) moment magnitude versus rupture distance for the ground motion records in the dataset

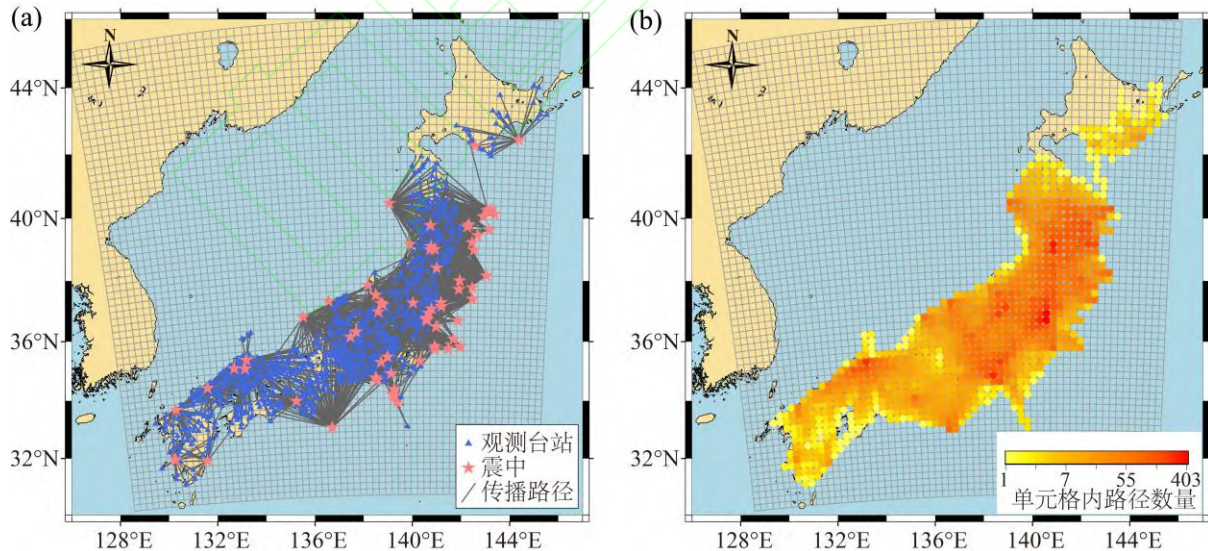


图 4 (a) 强震动记录传播路径的空间分布和 (b) 各地理单元格内传播路径数量
Figure 4 Spatial distribution of (a) the ground motion records and (b) the number of paths for cells

考虑到地球为椭球体，本文采用通用横轴墨卡托投影坐标系（即：Universal Transverse Mercator，简称 UTM 坐标）对研究区域进行单元格划分，单元格尺寸为 $25\text{km} \times 25\text{km}$ ，如图 4 所示。强震数据集中，所有地震事件、观测台站及观测记录传播路径在地理空间中的分布如图 4（a）所示，对于任

意强震动记录，本文假定由震源至观测台站所形成的直线为该记录的传播路径。可见，部分地震的震中位于日本周边的海域，地震事件的空间分布较稀疏；数据集中观测台站数量较多，其空间分布较密集。各单元格所包含的传播路径数量如图 4（b）所示，可见，在除北海道以外的其它地区，单个单元格内所包含的传播路径数量均较大，最长达 403 条。尽管单元格尺寸越小，计算得到的非弹性衰减分辨率越高，但也会导致单个单元格内的传播路径数量减少，从而增大单元格非弹性衰减率的认知不确定性，并增大高斯过程回归计算成本。经试算发现，单元格尺寸选在 10km~40km 对计算结果的影响较小，因此，本文选择了边长为 25km 的矩形单元格，此值小于或接近本文回归分析结果中的相关长度（见表 1），也证实了其合理性。

表 1 本文所建非遍历地震动模型超参数与随机标准差

Table 1 The hyper-parameter and standard deviation values of the nonergodic model in this study

T_p (s)	l_E	ω_E	l_S	ω_S	l_{Att}	ω_{Att}	τ	τ_0	τ_S	τ_{S0}	ϕ_{WS}	ϕ_{WS0}	σ_T	σ_{T0}
PGA	74.1	0.194	33.1	0.178	26.95	0.00334	0.369	0.264	0.280	0.187	0.420	0.359	0.625	0.483
0.05s	91.9	0.268	39.2	0.216	23.17	0.00357	0.441	0.277	0.315	0.200	0.412	0.350	0.681	0.489
0.1s	91.0	0.271	34.8	0.227	22.72	0.00394	0.436	0.276	0.405	0.298	0.431	0.363	0.735	0.545
0.2s	57.1	0.159	31.0	0.189	27.24	0.00416	0.330	0.256	0.383	0.301	0.459	0.386	0.684	0.553
0.5s	46.3	0.134	34.1	0.193	30.63	0.00311	0.334	0.289	0.343	0.252	0.466	0.403	0.669	0.556
1.0s	46.1	0.131	31.9	0.236	56.80	0.00221	0.358	0.318	0.383	0.257	0.431	0.387	0.678	0.563
2.0s	53.0	0.158	34.4	0.229	193.30	0.00153	0.326	0.269	0.352	0.223	0.384	0.365	0.614	0.505
4.0s	70.8	0.182	38.6	0.198	37.89	0.00166	0.338	0.243	0.309	0.201	0.365	0.323	0.586	0.451

3.2 模型系数及其认知不确定性

非遍历效应项均为空间函数，其空间变化规律由超参数和观测结果控制。模型超参数随谱周期的变化如表 1 所示。可见，本文得到的非遍历震源效应相关长度 l_E 均介于 45km 与 95km 之间、场地效应相关长度 l_S 介于 30km 与 40km 之间，路径效应中非弹性衰减调整系数的相关长度 l_{Att} 多介于 22km 至 60km 之间，仅在 2.0s 附近较大。 l_E 的值较 l_S 更大且随谱周期的波动更显著，这一方面与震源效应自身较强的空间变异性有关；另一方面，也与地震事件数量较少、空间分布较稀疏这一特征存在一定关系。超参数 ω 代表地震动效应在距观测记录很远位置处的标准差。非遍历震源效应空间变异系数 ω_E 和场地效应空间变异系数 ω_S 的值较大，受非弹性衰减系数值较小（通常为 10^{-3} 量级）这一特点影响，非遍历路径效应中非弹性衰减调整系数的空间变异系数 ω_{Att} 很小。

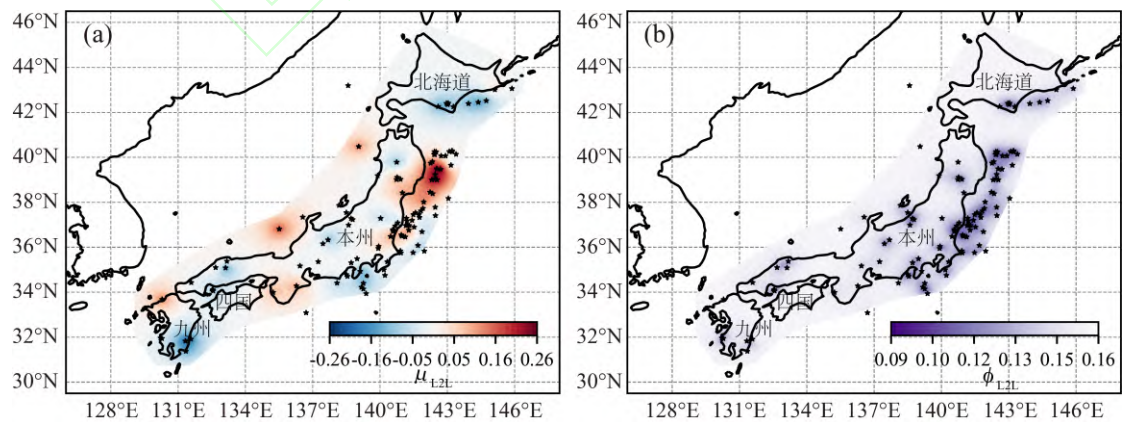


图 5 0.2s 谱周期的非遍历震源项的 (a) 预测均值 μ_{L2L} 及其 (b) 认知标准差 ϕ_{L2L} 随地理空间的分布

Figure 5 Spatial distribution of (a) the mean value μ_{L2L} and (b) the epistemic standard deviation ϕ_{L2L} for the nonergodic event term at the spectral period of 0.2s

非遍历震源项 δ_{L2L} 在 0.2s 的预测均值 μ_{L2L} 及其认知标准差 ϕ_{L2L} 的结果如图 5 所示。由于本文数据集集中的地震事件数量较少，地震事件的空间分布较稀疏，各事件之间的距离较大。图 5 (a) 中，大部分区域的 μ_{L2L} 值接近于零，这是因为这些区域不存在观测地震事件，难以推测其震源效应与遍历性震源效应之间的差异；在北海道、本州中南部地区和九州岛南部， μ_{L2L} 多为负值，遍历性震源效应项对这些地区的地震事件有所高估；在本州东北海域，遍历性震源效应项则有所低估。图 5 (b) 中，在观测地震事件位置附近，非遍历震源项的认知标准差 ϕ_{L2L} 较小，在远离观测地震事件的位置，认知标准差 ϕ_{L2L} 更大。较大的认知标准差是由于观测地震事件不存在，难以推断预测结果的可靠性。对于其它谱周期，非遍历震源效应的预测结果与图 5 所示结果存在较相似的特点，限于篇幅，不再赘述。

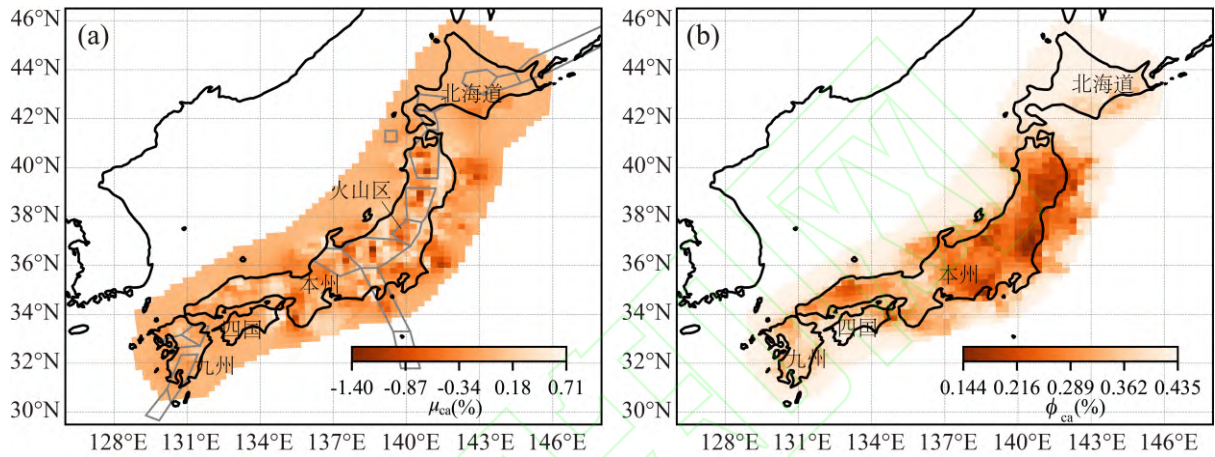


图 6 0.2s 谱周期的非弹性衰减调整系数的 (a) 预测均值 μ_{ca} 及其 (b) 认知标准差 ϕ_{ca} 随地理空间的分布

Figure 6 Spatial distribution of (a) the mean value μ_{ca} and (b) the epistemic standard deviation ϕ_{ca} of the anelastic attenuation adjustment coefficient at the spectral period of 0.2s

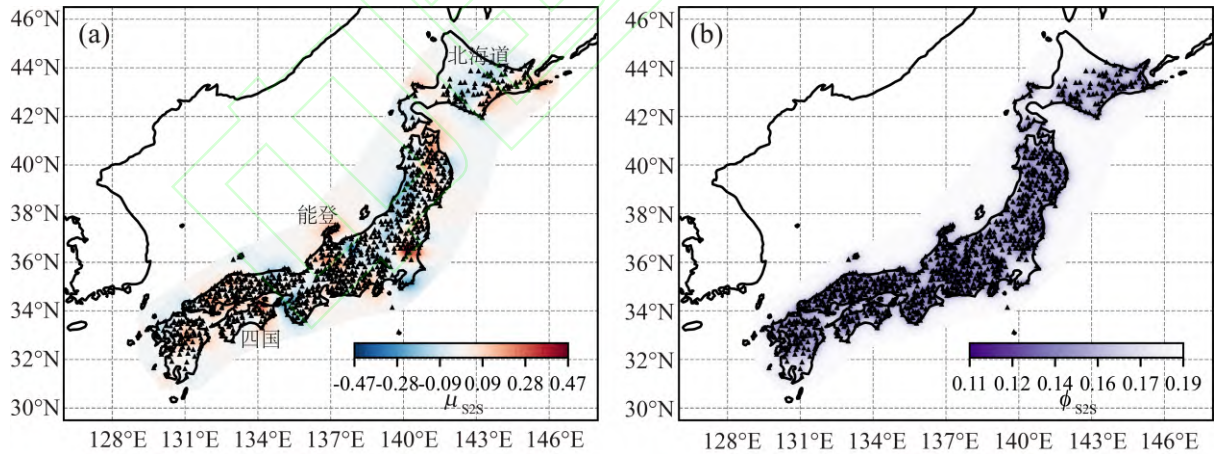


图 7 在 0.2s 谱周期非遍历场地效应项的 (a) 预测均值 μ_{s2s} 及其 (b) 认知标准差 ϕ_{s2s} 地理空间的分布

Figure 7 Spatial distribution of (a) the mean μ_{s2s} and (b) the epistemic standard deviation ϕ_{s2s} of the nonergodic site effect term at the spectral period of 0.2s

各单元格 0.2s 非弹性衰减调整系数 δ_{ca} 的预测均值及认知标准差在空间中的分布如图 6 所示。图 6 (a) 表明，非弹性衰减调整系数均值 μ_{ca} 在部分区域为负、部分区域为正，最大值为 0.0071，此结果能保证调整后的非弹性衰减率为负。同时， μ_{ca} 在地理空间内变化显著，体现出地壳传播介质的空间变化对地震动衰减的影响。在日本本州火山弧的后弧区，非弹性衰减系数的值更小（绝对值更大），这可能是由于地壳内火山溶岩物质的附加衰减作用所致，此结果与已有基于地震动记录的地壳

衰减结构反演结果吻合较好（Sung 等，2024）。图 6（b）中，对于地震记录传播路径数量较多的单元格，比如：本州的东北地区，非弹性衰减调整系数 δ_{ca} 的认知标准差 ϕ_{ca} 更小，这意味着图 6（a）中给出的 μ_{ca} 值在这些地区更可靠；在传播路径较少的单元格内，比如：日本北部的北海道地区，认知标准差 ϕ_{ca} 更大。对于不存在强震记录传播路径的单元格，其认知标准差的大小为 0.00435，此值与表 1 中给出的协方差 ω_{Att} 接近。

预测结果中，0.2s 非遍历场地项的预测均值及认知标准差的空间分布如图 7 所示。非遍历场地项由 HZ24 模型中的场地间残差经高斯过程回归后得到。图 7（a）中， δ_{s2s} 的预测均值 μ_{s2s} 在空间中具有显著区域性变化。在能登半岛、九州、四国等地区， μ_{s2s} 为正值，遍历性场地效应项低估了这些区域的场地反应；而在北海道中部等地区， μ_{s2s} 为负值，其场地反应被遍历性场地效应项高估。图 7（b）为 δ_{s2s} 的认知标准差 ϕ_{s2s} 在地理空间中的分布。可见，在台站分布密集的地区，所得认知标准差的值更小，而在台站稀疏地区，认知标准差的值更大，比如：北海道、关东盆地等地区。

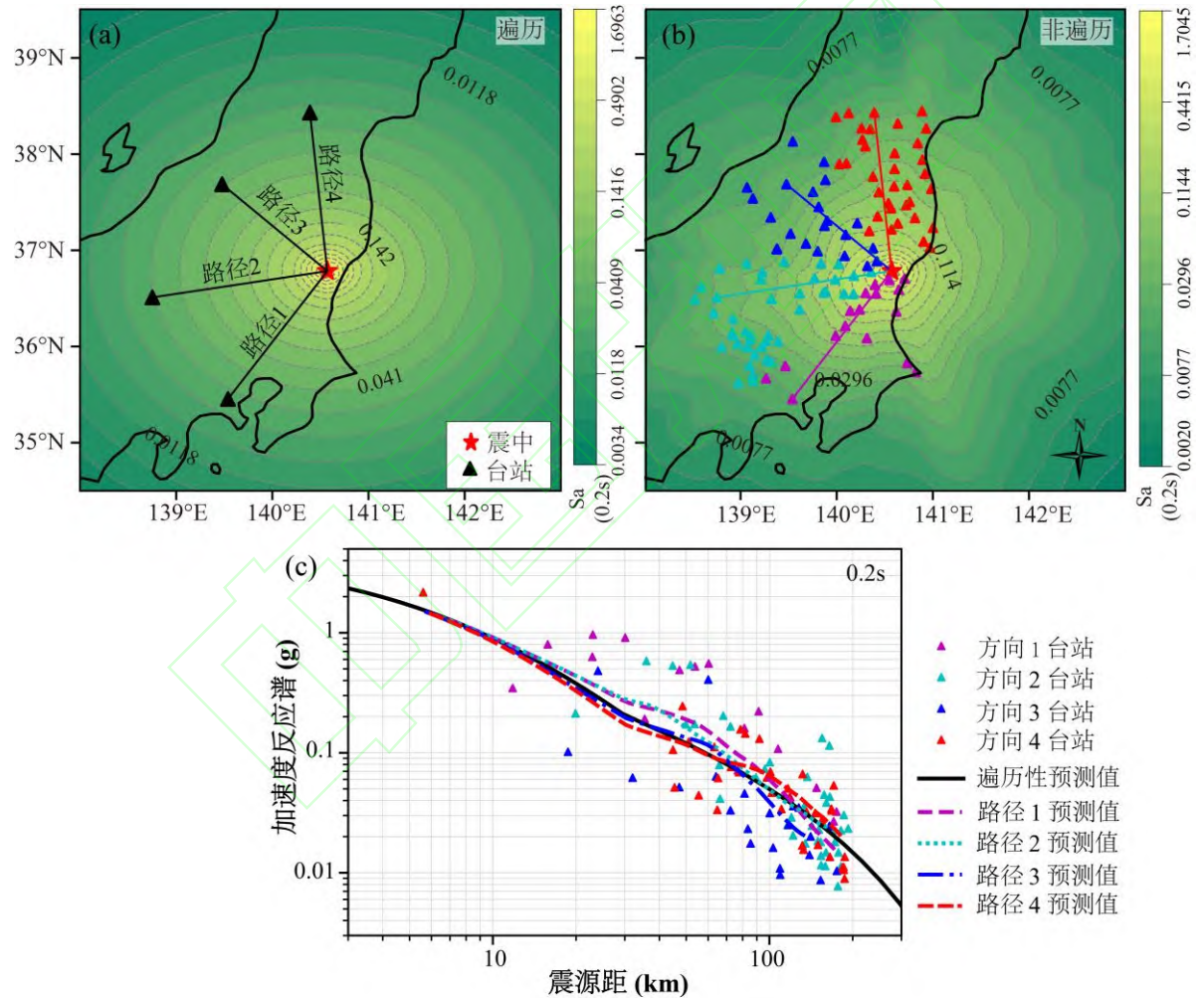


图 8 某地震情景下周期为 0.3s 的 II 类场地上（a）遍历性和（b）非遍历地震动模型 0.2s 加速度反应谱预测值的空间变化等值线及不同方向台站观测值和预测值随距离的衰减

Figure 8 Spatial distribution of the predicted spectral value by the (a) ergodic and (b) the nonergodic model for an earthquake scenario at the spectral period of 0.2s for SC II sites with site period of 0.3s, and the attenuation of the recorded spectral values and predicted values at different directions

3.3 加速度反应谱预测值

本文所建模型以遍历性 HZ24 模型为基本骨架, 遍历性效应的预测结果请参考相关文献, 此处不再重复。为充分体现非遍历效应模型对地震动空间变化特性的预测效果并进行充分验证, 选取 2011 年 3 月 19 日 18 点 56 分 (东京时间) 矩震级为 5.86、震源深度为 5.4km、断层机制为正断层、震中坐标为 (140.572° E, 36.784° N) 的一次地震事件, 分别计算遍历性假定下和非遍历假定下的地震动强度预测值, 场地类型为 II 类、场地周期为 0.3s。为便于读者利用本文所建模型开展预测, 已将相关结果及下图中计算程序公布 (<https://github.com/RbHou/Nonergodic-GMM-for-Japan>)。

0.2s 加速度反应谱的预测结果如图 8 所示。图 8 (a) 和 8 (b) 表明, 两种假定下的预测值在地理空间中的分布显著不同, 遍历性假定下的预测结果在空间中为各向同性、均匀变化的衰减过程, 等震线为同心椭圆, 如图 8 (a) 所示; 而非遍历假定下的预测值在地理空间中的分布是非均匀的, 其衰减率的大小与空间位置有关, 如图 8 (b) 所示。在非遍历假定下, 0.2s 反应谱的衰减以震中为原点, 在不同方向具有显著不同的衰减率。为进一步体现地震动衰减的空间变化特征和非遍历模型的预测效果, 将此次地震的观测记录按照方位的不同分为四组, 如图 8 (b) 中不同填充色的观测台站所示。这些台站的 0.2s 加速度反应谱观测值和预测值的衰减如图 8 (c) 所示, 可见, 蓝色符号代表的西北方向台站观测到的地震动衰减较快, 紫色符号代表的南向地震动衰减较慢, 图 8 (b) 中等震线也反映出了这种空间变化特征, 图 8 (c) 中非遍历模型衰减曲线能够更精准的反映这种差异, 二者均表明非遍历模型的预测性能优于遍历性模型。值得说明的是, 由于图 8 (c) 中在计算衰减曲线时, 采用的场地条件未随距离的增大而变化, 而图中三角符号代表的实际场地具有不同的场地条件, 导致不同方位的衰减曲线差异不明显; 同时, 本文仅考虑了非弹性衰减的非遍历特征, 未考虑几何衰减的非遍历特征, 这导致只有在传播距离很远时, 路径效应的非遍历性才能更显著的呈现。

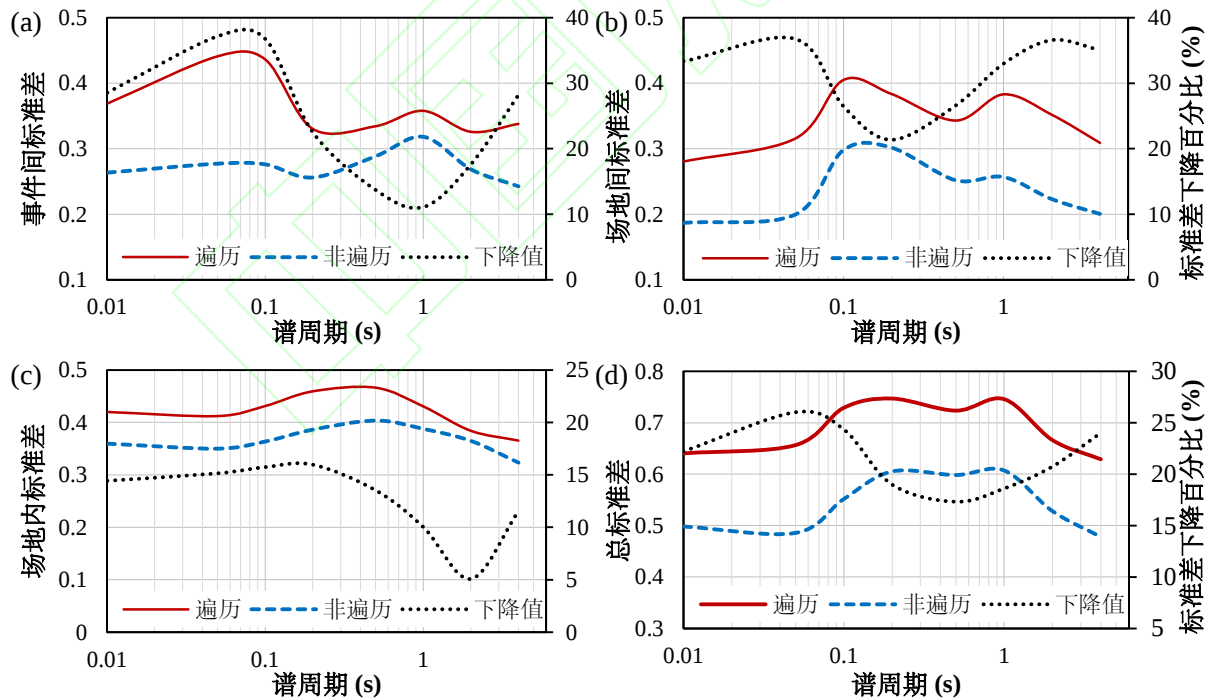


图 9 遍历性模型与非遍历模型 (a) 事件间标准差、(b) 场地间标准差、(c) 场地内标准差和 (d) 总标准差的对比
Figure 9 Comparison of the (a) between-event, (b) between-site, (c) within-site and (d) total standard deviations from the ergodic and nonergodic ground motion models

3.4 模型残差及标准差

地震动模型的残差为地震动强度参数观测值与模型预测值之差, 可用于评估所建模型的预测结

果的变异性 and 预测准确度，残差的标准差代表误差的统计分布规律。为突出非遍历地震动模型残差及标准差的特点，本节将其与遍历性地震动模型（HZ24 模型）的残差及标准差进行对比分析。

图 9 为遍历性地震动模型和非遍历地震动模型标准差的对比结果。图 9（a）表明，非遍历地震动模型的事件间标准差显著减小，在 0.1s 谱周期附近，标准差的下降幅度最大，从 0.45 降至 0.28，降幅接近 40%。场地间标准差的降低如图 9（b）所示，场地间标准差的降幅与谱周期之间的相关性不强，在小于 0.06s 的短周期和大于 1.0s 的长周期降低最显著，降低幅度在 20%与 40%之间。图 9（c）中场地内标准差的降低幅度弱于事件间标准差和场地间标准差，最显著降低发生在小于 0.3s 的短周期。总标准差的变化如图 9（d）所示，0.01s 加速度反应谱总标准差从 0.64 降低至 0.5，降幅为 22%；在 0.06s 附近的短周期，总标准差的下降幅度最低，达到 26%；在大于 2.0s 的长周期，总标准差的下降幅度也 20%，这与图 9（b）中场地间标准差在长周期的显著下降有关。以上分析表明，在地震动预测时，引入震源效应、路径效应和场地效应的空间变化和空间相关后，模型预测精度将得到显著提升。

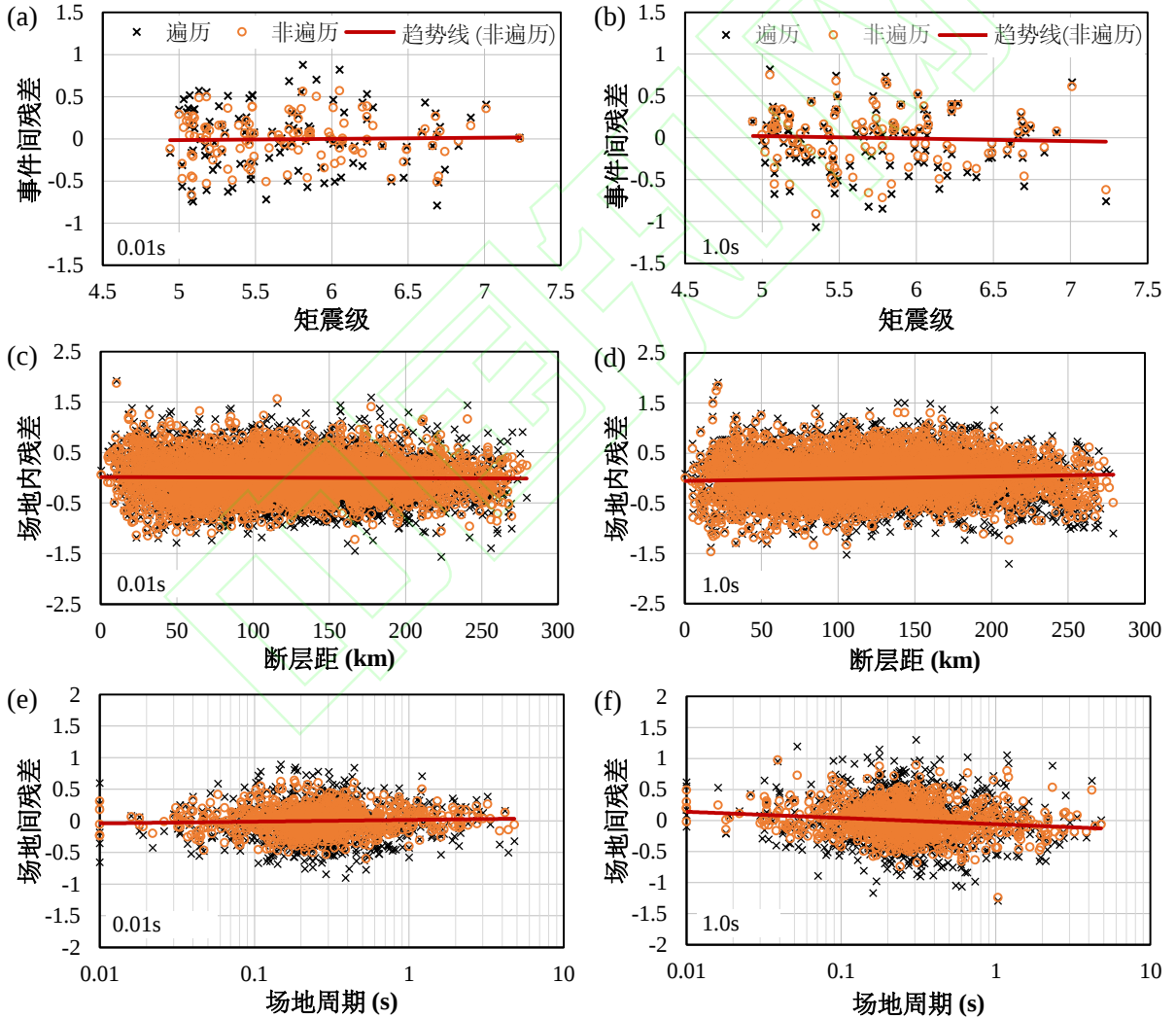


图 10 遍历性模型和非遍历模型中 0.01s 和 1.0s 加速度反应谱的残差分布对比

Figure 10 Comparison on the residuals from the ergodic and nonergodic models at the spectral period of 0.01s in the left panel and 1.0s in the right panel

图 10 为遍历性地震动模型和非遍历地震动模型的事件间、场地间和场地内残差的对比。图 10

(a)和10(b)为事件间残差的对比,由图可见,两个模型的事件间残差随矩震级的分布均较均衡,但非遍历地震动模型的事件间残差离散程度更小,其标准差更低,且在0.01s更显著,这与图9(a)中的对比结果一致。在引入非遍历效应项后,部分地震事件的事件间残差减小达0.4(自然对数坐标),意味着考虑地震事件的空间变化后预测偏差将变化约1.5倍。图10(c)和10(d)中,引入非遍历效应项后场地内残差的变化在断层距较小时不明显,但在断层距增大后场地内残差离散程度的降低明显。这与图9(c)中场地内标准差的下降幅度小于事件间标准差和场地间标准差相一致,这是因为本文通过将研究区域划分为单元格实现路径效应非弹性衰减空间变化的建模,非弹性衰减与传播距离成正比,在距离较小时,路径效应空间变化预测效果一般。对于场地效应,图10(e)和10(f)表明,非遍历函数项对残差离散程度的降低显著,且与场地周期之间的相关性一般。这意味着场地反应具有显著空间变化和区域性特征。

4 结论及建议

本文提出基于非遍历假定的地震动模型构建框架,将地震动效应在空间的变化过程假定为高斯随机过程,采用指数函数约束非遍历效应项的空间变化规律并采用贝叶斯方法确定模型超参数,给出模型预测方法及其不确定性计算方法。利用日本俯冲带地区1004个台站观测到的117次浅壳与上地幔地震5957条记录,以Hou和Zhao(2024)建立的遍历性地震动模型为基础,通过引入具有空间变化特性的震源效应项、路径效应项和场地效应项,建立非遍历地震动模型,评估非遍历地震动模型的预测效果。结果表明:

(1)非遍历地震动模型的反应谱预测值,在地理空间中呈现出非均匀衰减特征,能更准确地反映地壳介质品质因子、场地条件等因素的空间非均匀性对地震动强度的影响,采用该方法得到的预测偏差更小。

(2)基于非遍历假定,在地震动模型中引入空间变化地震动效应项后,模型预测结果的随机标准差将显著降低,震源效应、路径效应和场地效应的随机标准差最大降低值分别为38%、15%和38%。远距离记录路径效应变异性的下降优于近场记录。

(3)震源效应的相关长度介于45km与95km之间,在短周期更大;场地效应的相关长度介于30km至40km之间,与谱周期的相关较弱;路径效应的相关长度介于25km至60km之间,在短周期更小。

(4)尽管非遍历地震动模型的随机标准差较小,但在开展地震危险性分析时,尤其对于强震动观测记录稀疏的地区,模型的认知标准差不可忽视。认知标准差的大小与模型所用记录数量及地理位置相关,记录数量越多,认知标准差越小;距离观测事件和观测场地近的位置,认知标准差更小。

同时,本文所建非遍历地震动模型在以下方面仍存在一定不足:①在路径衰减方面,本文仅考虑了非弹性衰减的空间变化而未考虑几何衰减的空间变化,由于非弹性衰减量与传播距离呈线性关系,因此,只有在传播距离很远时,路径衰减的非遍历效应才能够突显出来,而强震数据集中传播距离较远的记录数量较少。针对此方面,后续应在几何衰减的非遍历性方面开展更多研究;②在确定非遍历地震动效应时采用空间分析方法,这意味着所得结果在空间中的分辨率取决于台站和地震的空间分布密度。由于观测台站的间距较大,强震动参数之间的空间相关是基于区域尺度的结果,难以用于局部场地。随着我国密集地震预警台网的建成,未来可开展更深精细的分析与预测,甚至融合地震动空间相干性;③相较于经典遍历性地震动模型,本文模型中的非遍历项更复杂,这增加了模型的应用难度,根据作者的研究经验,这是目前国内外非遍历地震动模型的通病,因此,如何

改进回归算法或者引入人工智能方法，在保证物理含义的同时提升模型的可用性，也是一项很有意义的研究工作。

本文提出的直接利用加速度反应谱建立非遍历地震动模型的方法，对于中大震记录较丰富的区域更适用，比如我国川滇地区；对于以中小地震记录为的地区，建议采用先建立傅里叶谱模型再转换为反应谱模型的方法，以合理规避由于反应谱谱形与震级等的复杂关系而可能引起的不合理外推结果。

参考文献

- Abrahamson N A, Kuehn N, Walling M, et al., 2019. Probabilistic Seismic Hazard Analysis in California Using Nonergodic Ground Motion Models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2019, 109(04): 1235-1249. <https://doi.org/10.1785/0120190030>
- Abrahamson N A, Gulerce Z, 2022. Summary of the Abrahamson and Gulerce NGA-SUB Ground-Motion Model for Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 38(4): 2638-2681. <https://doi.org/10.1177/87552930221114374>
- Anderson J G, Brune J N, 1999. Probabilistic Seismic Hazard Analysis without the Ergodic Assumption. *Seismological Research Letters*, 70(1): 19-28. <https://doi.org/10.1785/gssrl.70.1.19>
- Anderson J G, Hough S E, 1984. A Model for the Shape of the Fourier Amplitude Spectrum of Acceleration at High Frequencies. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(5), 1969-1993. <https://doi.org/10.1785/BSSA0740051969>
- Boore D M, 2003. Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method. *Pure and Applied Geophysics*, 160, 635-676. <https://doi.org/10.1007/PL00012553>
- Bozorgnia Y, Abrahamson N A, Atik L A, et al., 2014. NGA-West2 Research Project. *Earthquake Spectra*, 30(3): 973-987. <https://doi.org/10.1193/072113EQS209M>
- Bozorgnia Y, Abrahamson N A, Ahdi S K, et al., 2022. NGA-Subduction Research Program. *Earthquake Spectra*, 38(2): 783-798. <https://doi.org/10.1177/87552930211056081>
- Caramenti L, Menafoglio A, Sgobba S, Lanzano G, 2022. Multi-Source Geographically Weighted Regression for Regionalized Ground-Motion Models. *Spatial Statistics*, 47: 100610. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2022.100610>
- Cornell C A, 1968. Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583-1606. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583>
- Hou R, Zhao J, 2024. Ground Motion Prediction Equations for the Horizontal Component from Shallow Crustal and Upper Mantle Earthquakes in Japan Using Site Period as Site Parameter. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22: 763-794. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01796-7>
- Hou R, Liu J, Xie J, et al., 2025. Regional Ground Motion Characteristics and Topographic Effect in the 2023 December Ms 6.2 Jishishan Earthquake and Its Implication for Ground Motion Model Development in Northwestern China. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23: 2489-2514. <https://doi.org/10.1007/s10518-025-02162-5>
- Hu X, Yu C, Liu Z. et al., 2025. Ongoing Compressional Tectonism and Regional Seismic Hazard Revealed by the 2023 Mw 6.1 Jishishan Earthquake. *Journal of Earth Science*, 36, 275-290. <https://doi.org/10.1007/s12583-024-0126-9>
- Jayaram N, Baker J W, 2009. Correlation Model for Spatially Distributed Ground-Motion Intensities. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(15): 1687-1708. <https://doi.org/10.1002/eqe.922>
- Kuehn N M, Abrahamson N A, Walling M A, 2019. Incorporating nonergodic Path Effects into the NGA-West2 Ground-Motion Prediction Equations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(2): 575-585. <https://doi.org/10.1785/0120180260>
- Lan X, Xing H, Zhou J, et al., 2019. A Comparison of the Source, Path, and Site Effects of the Strong - Motion Records from the Western and the Southwestern Parts of China with Modern Ground - Motion Prediction Equations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(6): 2691-2709. <https://doi.org/10.1785/0120180293>
- Landwehr N, Kuehn N M, Scheffer T, Abrahamson N A, 2016. A Nonergodic Ground-Motion Model for California with Spatially Varying Coefficients. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(6): 2574-2583. <https://doi.org/10.1785/0120160118>
- Lavrentiadis G, Abrahamson N A, Nicolas K M, et al., 2023a. Overview and Introduction to Development of Non-Ergodic Earthquake Ground-Motion Models. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21: 5121-5150.

- <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01485-x>
- Lavrentiadis G, Abrahamson N A, Kuehn N M, 2023b. A Non-Ergodic Effective Amplitude Ground-Motion Model for California. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21: 5233-5264. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01206-w>
- Lin P S, Chiou B, Abrahamson N, et al., 2011. Repeatable Source, Site, and Path Effects on the Standard Deviation for Empirical Ground-Motion Prediction Models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(5): 2281-2295. <https://doi.org/10.1785/0120090312>
- Parker G A, Baltay A S, Rekoske J, et al., 2020. Repeatable Source, Path, and Site Effects from the 2019 M 7.1 Ridgecrest Earthquake Sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(4): 1530-1548. <https://doi.org/10.1785/0120200008>
- Phung V-B, Abrahamson N A, 2022. Conditional Ground-Motion Model Based on RVT Spectral Moments for Converting Fourier Amplitude Spectra to Response Spectra. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21: 5175-5207. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01559-w>
- Rasmussen C E, Williams C K I, 2006. *Gaussian Processes for Machine Learning*. The MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Sung C-H, Miyake H, Abrahamson N, 2024. Nonergodic Ground-Motion Models for Subduction Zone and Crustal Earthquakes in Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 114(3): 1717-1738. <https://doi.org/10.1785/0120230258>
- Xu P, Ren Y, Wen R, et al., 2020. Observations on Regional Variability in Ground-Motion Amplitude from Six Mw ~ 6.0 Earthquakes of the North-South Seismic Zone in China. *Pure and Applied Geophysics*, 177(1): 247-264. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02176-6>
- Zhang B, Yu Y, Li X, et al., 2022. Ground Motion Prediction Equation for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5% Damped Acceleration Response Spectra at Periods Ranging from 0.033 to 8.0s in Southwest China. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 159: 107297. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107297>
- Zhang B, Li X, Yu Y, et al., 2024. Strong Ground Motion Characteristics of the 2022 Mw 6.6 Luding Earthquake and Regional Variability in Ground Motion among Three Earthquake Areas in Sichuan, Southwest China. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(9): 4335-4355. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01934-9>
- 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 等, 2020. 地震动的空间相关性——以纳帕地震为例. *地震地质*, 42(5): 1218-1228.
- 傅磊, 谢俊举, 陈苏, 等, 2023. 四川地区场地放大系数特征分析及在强地震动模拟中的应用——以 2022 年芦山 M_S6.1 地震为例. *地球物理学报*, 66(7): 2933-2950.
- 郭文轩, 姚鑫鑫, 刘也, 等, 2025. 强震动记录 Flatfile 研究综述. *世界地震工程*, 41(1): 14-25.
- 胡进军, 张辉, 张齐, 2021. 基于四川西昌中强震数据的区域地震动预测模型. *振动与冲击*, 2021, 40 (02): 279-286.
- 霍俊荣, 胡聿贤, 1992. 地震动峰值参数衰减规律的研究. *地震工程与工程振动*, 1992(2): 1-11.
- 王海云, 2014. 基于强震观测数据的土层场地反应的研究现状. *地震工程与工程振动*, 34(4): 42-47.
- 王宏伟, 任叶飞, 温瑞智, 2017. 地震动震源、路径及场地效应分析的广义反演方法研究进展. *地球物理学进展*, 32(01): 78-86.
- 肖亮, 俞言祥, 2022. 我国大陆地区常用浅壳地震的地震动参数衰减关系. *地震学报*, 44(05): 752-764.
- 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. *震灾防御技术*, 8(1): 24-33.
- 赵翠萍, 陈章立, 华卫, 等, 2011. 中国大陆主要地震活动区中小地震震源参数研究. *地球物理学报*, 54(6): 1478-1489.
- 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, 2015. 中国地震动参数区划图(GB18306-2015). 中国标准出版社.
- 朱景宝, 刘赫奕, 栾世成, 等, 2025. 基于机器学习和迁移学习的现地地震动峰值预测. *地球科学*, 50 (05): 1842-1860.