

# 泸定 6.8 级地震强震动数据的 Kappa 参数研究

张潇男<sup>1,2</sup>, 王海云<sup>1,2</sup>, 李强<sup>1,2</sup>, 白云鹏<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** 地震动模拟通常为地震记录缺乏地区的建筑物抗震设防提供参考, 高频衰减因子  $\kappa$  是地震动模拟的重要参数, 控制着地震动傅氏谱高频下降的形状。本研究基于泸定 6.8 级地震记录, 使用帕曾窗对原始记录的傅氏谱进行平滑, 选择傅氏谱上  $p^H$  函数最小的频率区间作为高频衰减频段, 能够准确识别高频衰减的起止频率, 提高了计算的稳定性。共计算了 20 个数据质量较高台站的水平向  $\kappa$ , 并对  $\kappa$  分布趋势进行了分析, 分析结果表明: 随着帕曾窗窗宽的增大, 傅氏谱逐渐平滑, 窗宽大于 1 Hz 则会与原始谱出现明显偏离; 比较 12 个窗宽的帕曾窗对傅氏谱平滑的效果, 0.4 Hz 窗宽最佳, 可使曲线平滑且计算的  $\kappa$  误差小;  $\kappa$  分布有明显的方向性差异, 在东西向  $\kappa$  随震中距增大而明显增大, 在南北向随 PGA 的增大而明显减小。

**关键词:** 地震动; 高频衰减因子; 帕曾窗; 傅氏谱; 泸定地震

**中图分类号:** P315.91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)12-1993-10

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.12.001

## 1 研究背景

地震动模拟是工程地震研究的热点课题, 尤其是在缺乏地震动记录的地区建设如核电站、大坝等重要基础设施, 地震动随机模拟可以为重要建筑物的抗震设防提供依据<sup>[1]</sup>。在地震动模拟中, 高频衰减因子  $\kappa$  控制地震动傅氏谱高频下降的形状, 是不同场地条件下地震动模拟的关键参数<sup>[1-3]</sup>。

对  $\kappa$  的研究始于 20 世纪 80 年代, 研究者通过观察实际地震动的傅氏谱, 发现其在高频部分急剧衰减, 地震动高频衰减的现象与 BRUNE<sup>[4]</sup> 提出的  $\omega^2$  震源谱模型设定不符, 为了使地震动模拟更接近真实情况, 需要在以往模型的基础上加入高频滤波器函数, 由此展开了地震动高频衰减的研究。HANKS<sup>[5]</sup> 提出高频截止频率 ( $f_{\max}$ ) 的概念, 即高于此频率, 地震动傅氏谱急速下降。ANDERSON 等<sup>[6]</sup> 认为地震动在高频情况下呈现典型的指数衰减特征, 首次提出高频衰减因子  $\kappa$  的概念, 并建立具有高频衰减的傅氏谱幅值模型如下:

$$A(f) = A_0 e^{-\pi \kappa f}, \quad f > f_E \quad (1)$$

式中  $f_E$  为指数衰减开始频率;  $A_0$  为与震源特性和传播距离有关的常数, 又称之为零频渐近线。  $\kappa$  可

通过拟合半对数坐标系下的傅氏谱得到:

$$\kappa = \frac{\Delta \ln A(f)}{-\pi \Delta f}, \quad f_L < f < f_U \quad (2)$$

式中  $f_L$  为高频衰减起始频率;  $f_U$  为高频衰减截止频率。通过线性回归得到  $\kappa$ , 场地和路径对  $\kappa$  的影响得到了进一步的研究, 并确立了回归公式的形式<sup>[7-9]</sup>:

$$\kappa_{r,AS} = \kappa_0 + \tilde{\kappa}(R) \quad (3)$$

式中  $\kappa_{r,AS}$  为加速度傅里叶谱的高频衰减因子;  $\kappa_0$  表征地震动在场地下方垂直向上传播过程中土层构造引起的衰减, 为场地效应的参数;  $\tilde{\kappa}$  为地震动在地壳中横向传播引起的衰减参数<sup>[7]</sup>。许多研究在此基础上对如何通过地震动记录计算  $\kappa$  进行了深入的分析<sup>[10-12]</sup>。采用经典方法计算  $\kappa$  无法彻底消除路径对高频衰减的影响, 只能得到具有区域特点的  $\kappa$ 。为了得到不受震源和路径影响的高频衰减因子, 许多学者提出了计算方法。例如: 基于参考傅氏谱和目标傅氏谱的传递函数测量得到场地特定的  $\kappa$  值, 可以去除路径的影响<sup>[13-15]</sup>。AL ATIK 等<sup>[16]</sup> 基于以往的研究, 根据地震动衰减关系得到反应谱, 并使用逆随机振动方法得到傅氏谱, 然后计算高频衰减因子, 这种方式将地震动的震源和路径特点与高频衰减因子的计算结合起来, 减少了震源和路径造成的误差。OTH 等<sup>[17]</sup> 基于 KiK-net 的井下记录, 提出通过震源谱计算高频衰减因子, 可以通过单个记录确定场地

收稿日期: 2022-12-21; 修订日期: 2023-02-20

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务经费资助项目(2018B05); 国家自然科学基金地震联合基金资助项目(U2139207)。

的  $\kappa$ , 不必通过传统线性拟合方法得到, 提高了对于数据较少地区的适用性。EDWARDS 等<sup>[18]</sup> 提出以宽带反演方法得到的傅氏谱为基础计算  $\kappa$ , 由于高频衰减因子具有极高的区域性, 不同地区的衰减因子的取值可能相差很大, 因此必须根据不同场地、不同地区, 分别给出相应高频衰减因子的取值范围。KILB 等<sup>[19]</sup> 使用南加州地区 ANZA 地震网数据库中的中小震数据对  $\kappa$  进行研究。由于  $\kappa$  呈现区域性特征, 学者们对不同国家和地区进行了大量研究<sup>[20-23]</sup>。针对中国发生的地震事件中  $\kappa$  的研究目前还比较少, 近年来, SUN 等<sup>[24]</sup> 选择汶川地震主震 52 个台站的加速度时程计算了  $\kappa$  值, 并指出其变化范围为 0.0034~0.0468 s, 得到在东西、南北和竖向  $\kappa$  与距离的关系式; 傅磊等<sup>[25]</sup> 选用龙门山地区  $M_s 3.3\sim 8.0$  级 500 多个主余震强震动记录对  $\kappa$  进行研究, 分析了高程对场地高频衰减因子的影响, 并提出了经验公式; 随后, 傅磊等<sup>[26]</sup> 根据台站和地震事件分布将云南分为西南、西北、中部和东北 4 个区域, 使用 2008—2015 年云南地区 102 个强震动台站记录的 719 组三分量强震动记录, 计算得到了  $\kappa$  场地分量模型。在高频衰减因子研究中, 采用原始傅氏谱的较多, 然而地震记录未经平滑, 不仅曲线杂乱还会受到噪声的影响, 难以识别出准确的高频衰减的频带。GÜLÜM 等<sup>[27]</sup> 比较了采用 K-O 窗平滑后的傅氏谱和未经平滑的谱, 发现平滑后的傅氏谱可以提高选择频带准确性, 但 K-O 窗对线性坐标系适用性不强, 平滑的同时, 也给  $\kappa$  估计带来了一定的误差, 必须要选择合理的平滑方法和平滑参数, 提高拾取起止频率准确性。选择合适的窗函数进行平滑对计算显得尤为重要, 帕曾窗因其频谱泄漏小的特点, 得到广泛的使用<sup>[28]</sup>。

合理的起止频率才能回归出可信的  $\kappa$ , 对于如何选取高频衰减频段, 大量的研究提出了不同的标准。ANDERSON 等<sup>[6]</sup> 根据当时仪器灵敏度水平, 对选取的 EI 波采用的频段为 2~12 Hz, 对于圣费尔南多记录选取 2~18 Hz 频段, 过高的频率被认为是不可信的。高频衰减起始频率  $f_L$  由研究者根据傅里叶谱形状和  $f_{\max}$  选择。高频衰减截止频率  $f_U$  与记录的信噪比有关, 应当减少噪声的干扰。许多研究将  $f_U$  定义为信噪比高于某个阈值(通常取为 3)的频率<sup>[29]</sup>。TRIFUNAC<sup>[30]</sup> 指出地震记录处理频率应该在 25 Hz 以内, 尽管随着技术的发展已经可以将频率扩展到 50 Hz。有研究提出了一个更标准化的替代方案, 将 95% 的谱能量对应频率  $f_{95}$  作为高频衰减的截止频率<sup>[31]</sup>。PURVANCE 等<sup>[32]</sup> 根据不同地震事件将选取频带分为 10~30, 25~45 和 10~45 Hz, PALMER 等<sup>[33]</sup> 对于加拿大地区岩石场地地震记录,

研究选用频率范围为 15~36 Hz, 并根据地域细分为加东地区取 21~36 Hz, 加西地区取 15~36 Hz, 这给自动化选取高频衰减频带提供了可能; 在此基础上发展了基于目标函数自动拾取频带的方法<sup>[34]</sup>。为了提高自动拾取起止频率的稳定性, 有研究采用扩大起止区间, 多次迭代来确定起止频率<sup>[21]</sup>。许多学者考虑到准确性依然是通过人工观察选取频带<sup>[31,34-35]</sup>。由于记录的频率和噪声水平不同, 为排除噪声的干扰和避免接近奈奎斯特频率导致的失真, 有的研究根据地震动的差异和记录仪器有效带宽的不同, 建议给出有差异的起止频率的选择范围<sup>[25]</sup>。本研究在以往研究的基础上, 将傅氏谱进行谱窗平滑, 在光滑的傅氏谱上选择使函数  $p^H$  最小的频率组合作为起止频率, 通过这些处理, 减少了在选择频带时的人工干预, 可以提高计算的稳定性。

2022 年 9 月 5 日四川泸定发生 6.8 级地震 ( $M_w=6.6$ ), 震源深度 16 km, 震源机制为走滑型地震, 此次地震是中国近年发生的具有较大破坏力的地震之一, 造成了人员伤亡和财产损失。地震发生后, 中国地震局工程力学研究所强震动观测组发布了烈度仪和强震仪记录到的数据, 其中强震仪数据质量较好, 本研究选择震中距小于 150 km 且数据质量较好的 20 个强震台站, 选择的是台站的水平向地震记录。为了避免截取 S 波造成的误差, 本研究选择整个地震动加速度时程进行研究, 首先对这些记录的傅氏谱进行谱窗平滑, 比较了 0.1~3.0 Hz 带宽帕曾窗平滑对傅氏谱的影响, 发现 0.4 Hz 带宽的傅氏谱能够较准确地选择高频衰减的起止频率, 减少了误差, 计算稳定性得到提高, 经 0.4 Hz 窗宽的帕曾窗处理后, 傅氏谱可识别性得到提高, 能够较准确地进行场地高频衰减因子的计算。结果显示不同水平向的  $\kappa$  有明显的差异, 表明地震动方向性较为明显。最后与 SUN 等<sup>[24]</sup>、傅磊等<sup>[25]</sup> 的研究进行了对比, 由于震源和路径因素的影响, 本研究计算的  $\kappa$  参数略大于傅磊等<sup>[25]</sup> 的研究结果, 由于选择起止频率带宽的差异, 本研究计算的  $\kappa$  参数明显大于 SUN 等<sup>[24]</sup> 给出的值。

## 2 地震数据

国家地震烈度速报与预警工程建设有基准站(强震仪数据)、基本站(强震仪数据)和一般站(烈度仪)<sup>[36]</sup>。其中基准站和基本站的强震仪数据质量高, 能较好地用于研究地震的高频衰减因子。本研究共选取了 20 个台站的强震仪水平向加速度记录, 表 1 给出了选用台站和其记录的信息, 包括水平向的峰

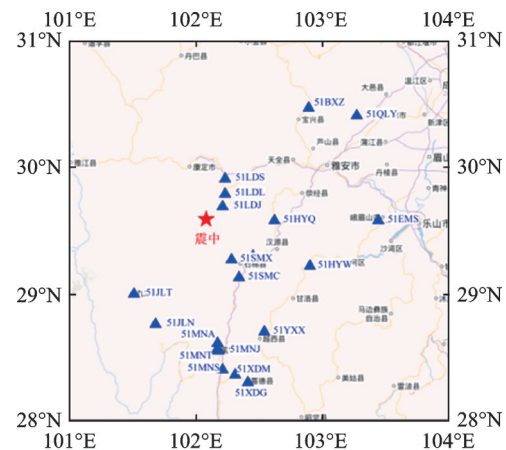
表 1 研究选用台站及记录的信息  
Tab. 1 Information of stations and records in the study

台站名称	场地分类	PGA-EW/gal	PGA-NS/gal	经度(E)/(°)	纬度(N)/(°)	震中距/km
51LDJ	C	110.171	306.071	102.21	29.69	16.20
51LDL	C	303.829	199.335	102.23	29.79	26.12
51LDS	C	62.932	44.917	102.23	29.91	38.67
51SMX	C	185.247	178.248	102.28	29.27	39.89
51SMM	C	394.684	317.004	102.45	29.30	48.15
51HYQ	C	46.907	76.757	102.62	29.58	52.52
51SMC	C	88.264	79.335	102.34	29.13	56.91
51JLT	B	127.753	147.054	101.51	29.00	85.97
51HYW	C	37.746	32.269	102.90	29.22	89.53
51JLN	C	69.404	88.884	101.68	28.76	100.70
51YXX	C	31.490	50.199	102.54	28.70	108.52
51MNA	C	26.050	29.193	102.17	28.61	109.43
51MNJ	C	25.201	16.792	102.18	28.55	116.14
51MNT	—	86.736	90.877	102.16	28.55	116.22
51BXZ	B	14.286	13.494	102.89	30.47	124.97
51EMS	—	22.986	13.717	103.44	29.58	131.13
51MNS	C	14.012	14.179	102.21	28.40	133.44
51XDM	C	11.227	8.789	102.31	28.36	139.15
51QLY	B	3.328	3.217	103.27	30.41	145.93
51XDG	C	5.592	4.507	102.41	28.30	146.58

注: 场地分类来自喻焯等<sup>[37]</sup>的研究, 其中“—”代表未公开台站场地基本信息。

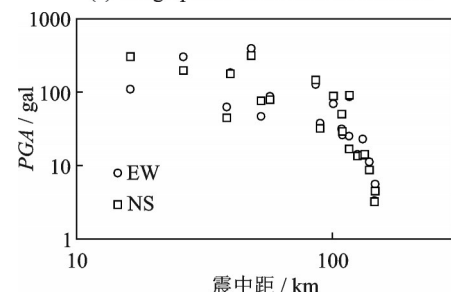
值加速度(*PGA*)、坐标和震中距。数据选择和剔除的标准为: (1) 选择的记录波形应当完整, 防止数据记录不全造成的误差; (2) 台站的震中距为 0~150 km, 因为震中距过大会导致地震动高频成分快速衰减; (3) 每条记录的信噪比应当大于 3, 防止噪声对高频成分的干扰; (4) 所有记录均使用 4 阶带通 (0.01~30 Hz) 巴特沃斯滤波器滤波以去除噪声部分, 对滤波后的记录进行检查并剔除谱型改变较大的记录; (5) 由于此次地震取得的竖向记录整体信噪比较低, 且有些记录的波形不完整, 因此舍弃竖向的记录。本研究选择的地震动记录动加速度峰值 (*PGA*) 和震中距分布如图 1 所示。

图 1 展示了台站位置分布和地震记录的 *PGA* 随震中距的变化趋势, 可以得到: 位于震中最近的 51LDJ 台站 (震中距为 16 km) 的方向性较为明显, 其位于震中的东北方向, 东西向 *PGA* 显著小于南北向 *PGA*; 随着震源距增加, 震中距大于 100 km, 东西向和南北向 *PGA* 趋于一致。震中距在 16~100 km 之间, *PGA* 衰减不明显; 震中距大于 100 km, *PGA* 快速下降。表 1 为本研究选择的地震动的台站及记录的相应信息。表 1 中最小震中距为 16.20 km, 最大震中距为 146.58 km, 南北向记录中 *PGA* 最大为 51LDJ 台站记录的 306.071 gal, 东西向记录中 *PGA*



(a) 台站分布

(a) Geographical distribution of stations



(b) 地震记录 *PGA* 随震中距的分布趋势

(b) Distribution trend of *PGA* of ground motion records with epicenter distance

图 1 台站和地震动记录 *PGA* 分布

Fig. 1 Distribution of stations and *PGA* of ground motion records



最大为 51SMM 台站记录的 394.684 gal。

### 3 谱窗平滑及起止频率选取的方法

#### 3.1 不同窗函数的比较

地震动的傅氏谱存在许多锯齿状的尖点,对研究傅氏谱的变化趋势形成了干扰,为了使谱线尽可能的平滑,通常使用窗函数对傅氏谱进行处理。处理的方式是傅氏谱与频率的某个函数相乘,进行滑动平均,函数平滑后的傅氏谱如下<sup>[28]</sup>:

$$\bar{G}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(g)W(f-g)dg \quad (4)$$

式中  $G(f)$  为原傅氏谱; $\bar{G}(f)$  为经平滑后的傅氏谱; $W(f)$  为谱窗,谱窗的使用不能改变原傅氏谱变化趋势。常用的谱窗有矩形窗、巴特利特窗和帕曾窗,这三种窗函数形式如下:

$$W(f) = cu \left( \frac{\sin \frac{2\pi uf}{n}}{\frac{2\pi uf}{n}} \right)^n \quad (5)$$

式中  $u$  为与带宽相关的常数,单位为 s;当  $c=2, n=1$  为矩形窗;当  $c=1, n=2$  为巴特利特窗;当  $c=0.75, n=4$  为帕曾窗。由于这三种谱窗并没有像矩形脉冲明确的带宽的计算方式,窗宽是先计算窗的标准差,然后对比具有相同标准差的矩形脉冲,将具有相同标准差的矩形脉冲的带宽作为窗的带宽,带宽的计算方式如表 2 所示。

表 2 不同窗的参数及带宽

Tab. 2 Parameters and bandwidths of different windows

窗名	$c$	$n$	窗的带宽/Hz
矩形窗	2	1	$\frac{1}{2u}$
巴特利特窗	1	2	$\frac{3}{2u}$
帕曾窗	0.75	4	$\frac{280}{151u}$

由表 2 可知,不同窗的  $u$  与带宽成反比, $u$  越小则带宽越大,傅氏谱越平滑。在应用谱窗时,通常要注意泄漏的影响,矩形窗泄漏最大,帕曾窗泄漏最小,平滑后的傅氏谱接近原始谱的趋势,因此应用帕曾窗对地震动傅氏谱进行平滑是较好的方法。

#### 3.2 高频衰减起止频率的选取

高频消减频带选择标准不统一影响频带选择的准确性,研究者的主观原因造成频带选择误差,为了减少人工干预,本研究采用自动选择高频消减频带的算法。根据此次泸定地震的特性,本研究选定的

起始频率不低于 2 Hz。由于在对地震动时程进行快速傅里叶变化(FFT)时有尼奎斯特频率的存在,过高的频率导致信号噪声水平高,为避免尼奎斯特频率的影响,本研究选定的截止频率为 30 Hz,同时也防止高频噪声引起的误差。在 2~30 Hz 范围内选择一个频率区间,选择起始和截止频率,起始和截止频率的差不小于 10 Hz,防止因频带过小与傅氏谱的整体特征不符。为了选择符合要求的线性拟合的起止频率,根据 SONNEMANN 等<sup>[34]</sup>提出的方法,构造线性拟合均方根误差( $rmse$ )和频带宽度( $\Delta f$ )的商函数  $p^H$ ,如下式所示:

$$p^H = \frac{rmse}{\sqrt{\Delta f}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2 / N}}{\sqrt{f_U - f_L}} \quad (6)$$

式中  $Y_i$  为拟合傅氏谱值; $y_i$  为傅氏谱值; $N$  为总采样点数。 $f_L$  为起始频率,选择范围在 2~10 Hz 之间; $f_U$  为截止频率,选择范围在 15~30 Hz 之间。在频率范围内逐个计算函数  $p^H$  的值, $p^H$  最小时则可认为该频带为最佳拟合频带,即为高频衰减的频带,该频带的起始和终止频率即为高频衰减的起止频率。

#### 3.3 平滑后的傅氏谱与频带选择

图 2 展示了 51LDJ 台站东西向记录经过不同宽度的窗平滑后的傅氏谱与未经平滑的原始谱的对比。由图可得:该台站记录的高频衰减的频段在 2~30 Hz 之间,尤其是 2~20 Hz 区间有较大的衰减,在 0~2 Hz 区间傅氏谱逐渐增大,然后出现拐点,拐点即为起始频率( $f_L$ );未经平滑的原始谱十分杂乱,难以识别准确的高频衰减区间,存在大量的“尖点”,随着窗宽的增加,谱曲线逐渐平滑,特别是在窗宽大于 1.0 Hz 后,尖点现象得到很大程度的改善,变成平滑的曲线,但同时高频衰减的起止频率变得不够明显,存在过度平滑的现象,不能更准确地找到目标频率。窗宽越小,与原始谱越接近,保留的地震动特性就越多,0.1~0.4 Hz 的窗宽平滑的傅氏谱总体上没有改变原始谱的特性;对于 3.0 Hz 的窗宽,谱线发生较大改变,偏离原始谱较多。图 3 展示了东西向和南北向记录的起始频率( $f_L$ )和截止频率( $f_U$ )的分布。

## 4 计算结果分析与讨论

#### 4.1 不同窗宽 $\kappa$ 的计算结果

采用帕曾窗进行平滑,选择合理的窗宽是取得稳定的高频衰减因子的基础,如果窗宽过大,则会改变地震动本身的特性,无法准确识别起止频率;如果窗宽过小,傅氏谱上仍然保留较多毛刺<sup>[38]</sup>,无法准确

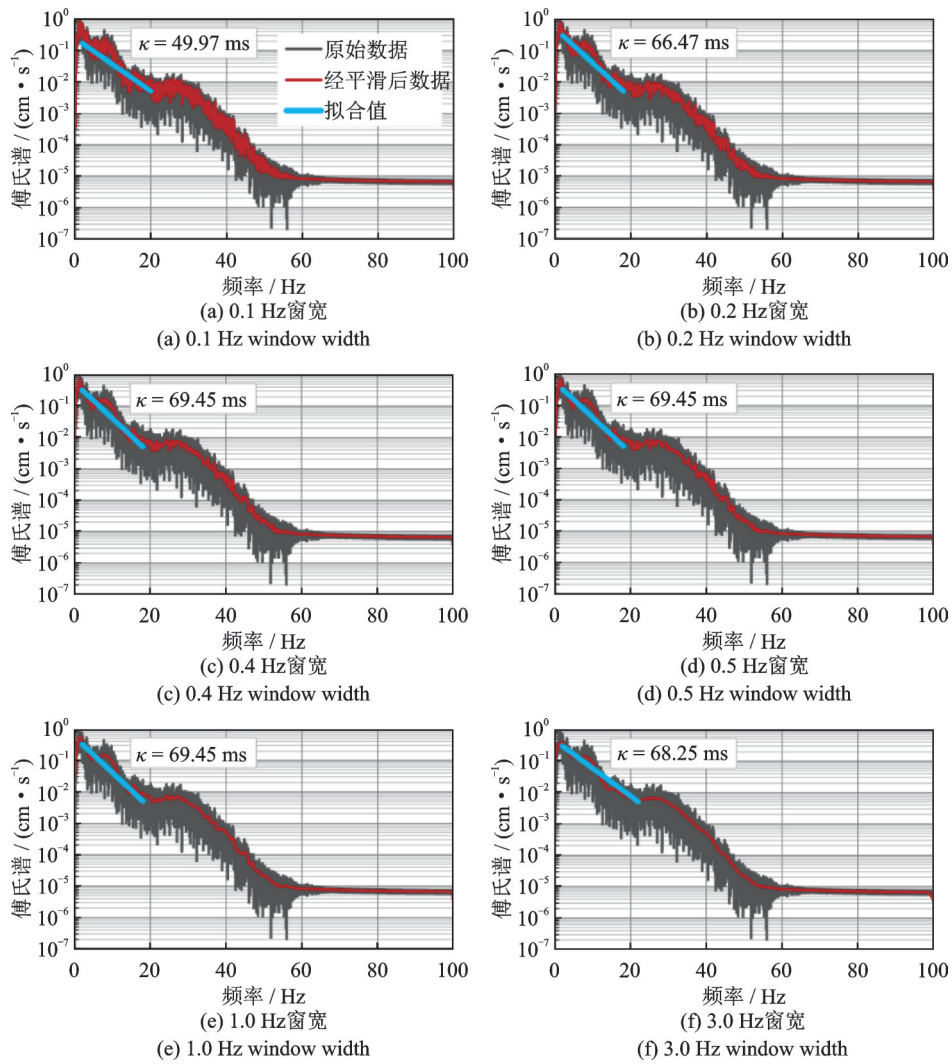


图 2 51LDJ 台站不同窗宽平滑后的傅氏谱与未经平滑的傅氏谱对比

Fig. 2 Comparison of Fourier spectra with different window widths and unsmoothed Fourier spectra of 51LDJ station

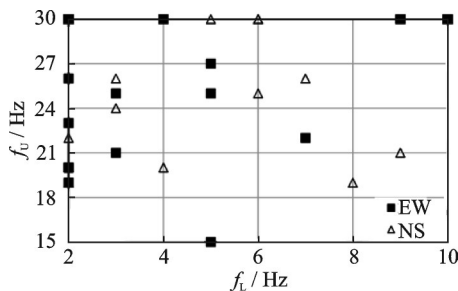


图 3 东西向和南北向不同台站的起始频率( $f_l$ )和截止频率( $f_u$ )的分布

Fig. 3 Distribution of lower frequency ( $f_l$ ) and upper frequency ( $f_u$ ) of different stations in the EW and NS directions

识别起止区间,因此平滑的原则是在尽量不丢失地震动本身高频成分的基础上,得到平滑的傅氏谱,便于识别高频衰减区间的起止频率。为了研究帕曾窗宽度与傅氏谱曲线的关系,选择了 0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.8,1.0,1.2,1.6,2.0 和 3.0 Hz 这 12 个不同的窗宽值进行对比。51LDJ,51SMC 和 51JLN 台站

场地信息明确<sup>[37]</sup>,且震中距适中,下面以这三个台站为例,介绍不同窗宽对  $\kappa$  值的影响,并选择最佳窗宽。

图 4 展示了 51LDJ,51SMC 和 51JLN 三个台站的东向西和南北向记录经过不同窗宽的帕曾窗平滑后的  $\kappa$  值,不同窗宽平滑后的傅氏谱计算的  $\kappa$  值有一定的差异,在窗宽过小或者过大的情况下,均导致计算有一定的偏差。51LDJ 的震中距为 16 km,为距

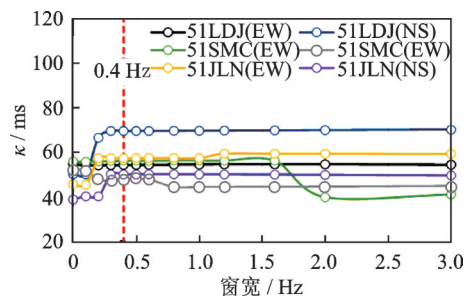


图 4  $\kappa$  随帕曾窗宽的变化趋势

Fig. 4 Variation trend of  $\kappa$  with respect to Parzen window widths

离震中较近的台站,可以看出,在窗宽较小的情况下,东西向(EW)记录傅氏谱计算的 $\kappa$ 值小,随着窗宽的增大, $\kappa$ 值逐渐增加然后保持稳定,0.4 Hz窗宽是最小的能使 $\kappa$ 值保持稳定的窗宽。51SMC台站震中距为56 km,当窗宽大于0.5 Hz时,东西向(EW)记录和南北向(NS)记录均逐渐出现了较大差异,这是由于窗宽过大导致平滑后地震动幅值谱趋势相对于地震动产生了较大改变,因此不能选择过大的窗宽<sup>[39]</sup>。51JLN台站震中距为101 km,可以看出,在0.4~1.0 Hz窗宽范围,对于不同震中距的台站和不同方向的记录, $\kappa$ 值能够保持稳定,不平滑或者窗宽过大的平滑都会导致拟合不稳定。

图5展示了51LDJ,51SMC和51JLN三个台站的東西向(EW)和南北向(NS)记录经过不同窗宽的帕曾窗平滑后的 $\kappa$ 值。由图可得:(1)总体上拟合优度逐渐增大后趋于稳定,均方根误差则逐渐减小后趋于稳定;(2)拟合优度在窗宽为0.1~0.4 Hz区间内增长较快,0.5 Hz以上增长变慢并逐渐保持稳定;(3)均方根误差在窗宽为0.1~0.4 Hz区间内下降较快,0.5 Hz以上下降缓慢并保持稳定;(4)带宽取0.4 Hz时,拟合优度较高,均方根误差较小,同时也能尽可能保留地震动傅氏谱特征;(5)三个台站的東西向(EW)记录和南北向(NS)记录的均方根误差( $rmse$ )出现明显差异,51LDJ台站東西向均方根误差最大,

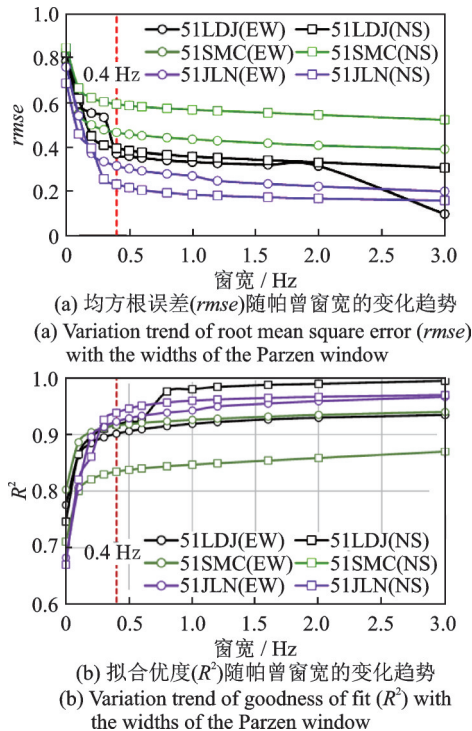


图5 均方根误差( $rmse$ )和拟合优度( $R^2$ )随帕曾窗宽的变化趋势

Fig. 5 Variation trend of root mean square error ( $rmse$ ) and goodness of fit ( $R^2$ ) with the widths of the Parzen window

51JLN台站南北向均方根误差最小;与之相对比的是,51JLN台站南北向记录拟合优度相对较大,51LDJ台站東西向拟合优度最小。表3展示了東西向和南北向高频衰减因子及起止频率。

表3 研究选用台站水平向的 $\kappa$ 及起止频率

Tab. 3 Horizontal  $\kappa$  and lower and upper frequencies of selected stations

台站名称	EW			NS		
	$f_l$ /Hz	$f_u$ /Hz	$\kappa$ /ms	$f_l$ /Hz	$f_u$ /Hz	$\kappa$ /ms
51LDJ	10	30	29.83	2	23	69.45
51LDL	3	25	54.15	4	30	47.05
51LDS	4	30	41.90	6	25	40.37
51SMX	5	27	47.55	7	26	56.05
51SMM	2	30	34.92	2	22	34.51
51HYQ	3	21	18.41	4	20	20.96
51SMC	7	22	52.43	2	30	60.48
51JLT	10	30	27.38	5	30	21.31
51HYW	2	26	17.75	9	21	7.56
51JLN	9	30	57.24	10	30	49.92
51YXX	2	23	69.94	2	30	62.65
51MNA	2	30	40.49	2	20	20.01
51MNJ	2	30	65.44	2	30	64.24
51MNT	10	30	57.94	6	30	67.46
51BXZ	9	30	72.70	3	24	35.78
51EMS	5	15	58.39	6	30	64.43
51MNS	2	19	71.04	3	26	64.79
51XDM	2	30	37.49	2	30	38.08
51QLY	2	20	42.55	8	19	67.75
51XDG	2	20	57.43	2	19	49.83

4.2 不同台站的 $\kappa$ 分布趋势

图6展示了不同台站東西向和南北向记录的 $\kappa$ 的变化趋势及其线拟合值。图6(a)展示了 $\kappa$ 随震中距的分布趋势,得到拟合公式为: $\kappa=0.172R+32.005$ (東西向); $\kappa=0.064R+40.591$ (南北向);台站的震中距在1~150 km范围内均匀分布,東西向 $\kappa$ 值随震中距增加有明显的线性增加的趋势,而南北向的 $\kappa$ 值随震中距的增加其线性增加趋势不明显。图6(b)展示了 $\kappa$ 随PGA的分布趋势,大部分记录的PGA在100 gal以下,随着PGA的增加,南北向记录的 $\kappa$ 值有减小的趋势。随着PGA的增大,土体展现出越来越强的非线性性质,造成场地基本周期向增大的方向移动,这对 $\kappa$ 取值产生了影响,JI等<sup>[40]</sup>在对Kik-net地表台站数据研究中也认为场地非线性的性质会导致 $\kappa$ 下降,今后应当在本研究的基础上继续深入研究场地与 $\kappa$ 的相关性,研究结果可用于建立地震动模拟场地效应模型。由图6可知,在震中



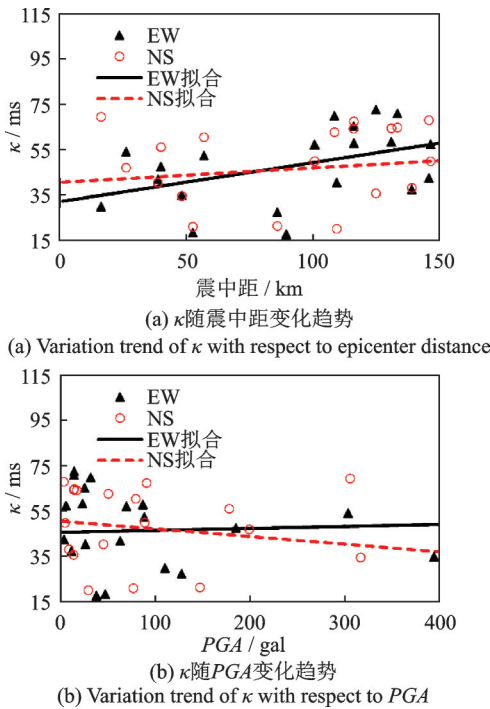


图 6 不同台站东西向(EW)和南北向(NS)记录的  $\kappa$  随震中距和 PGA 变化趋势  
Fig. 6 Variation trend of  $\kappa$  (EW and NS) with respect to epicenter distance and PGA

距小于 150 km 范围内,本研究计算的  $\kappa$  基本在 20~80 ms 范围内;其中震中距在 50 km 以下,东西向的  $\kappa$  基本在 15~55 ms 范围内,震中距大于 100 km,东西向的  $\kappa$  取值在 35~75 ms 范围内,近场和远场的差异较为明显。由于此次地震震源机制为走滑型,且根据 USGS 地震灾害计划发布的矩心矩张量解可以得出断层走向接近南北向,因此随着震中距的增加东西向的衰减更为明显。

### 4.3 与其他研究的对比

傅磊等<sup>[25]</sup>(以下简称为傅磊 2017)计算了龙门山地区 50 个断层距小于 150 km 的强震动台站的仅与场地相关的 Kappa 模型( $\kappa_0$ ),SUN 等<sup>[24]</sup>(以下简称为 SUN2013)根据汶川地震主震的数据,建立了  $\kappa$  回归公式,图 7 展示了本研究与 SUN2013、傅磊 2017 的对比。由图 7 可得:(1)傅磊 2017 给出了汶川地震主震  $\kappa_0$  的水平、竖向平均值,为了更好地对比此次泸定地震与汶川地震主震  $\kappa$  的分布,图 7(c)展示了  $\kappa$  水平、竖向平均值的对比,整体上本研究计算得到的  $\kappa$  最大,傅磊 2017 给出的  $\kappa_0$  居中,而 SUN2013 给出的  $\kappa$  最小;(2)傅磊 2017 通过计算每个台站多个地震记录的  $\kappa$ ,拟合得到每个台站的  $\kappa_0$ ,略小于本研究得到的  $\kappa$ ,这是由于本研究是基于单次地震的数据计算的  $\kappa$ ,震源和路径因素均对  $\kappa$  取值有影响;(3)本研究计算的值更大,且方向性明显,此

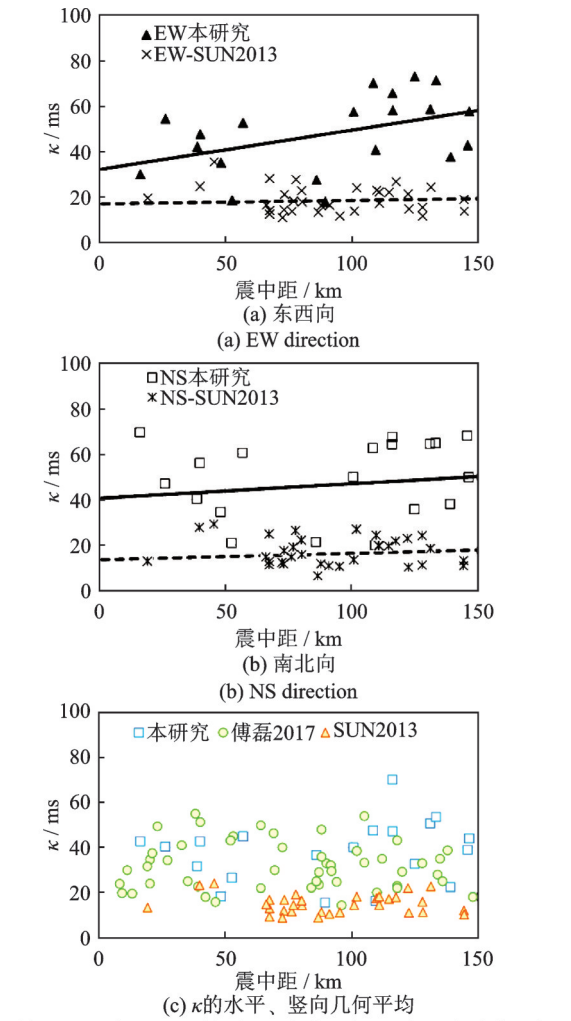


图 7 本研究与其他研究的对比  
Fig. 7 Comparison of this study and other studies

次地震近场记录比 2008 年汶川地震的多,震中距在 150 km 以内分布更均匀,SUN2013 选择的频率范围远比本研究要大,有些记录的截止频率( $f_U$ )达到 80 Hz,这也造成其计算频带宽与本研究有较大的差异,计算结果也小于本研究,而本研究与傅磊 2017 选择的频带更接近,所以结果也较为相近。从控制噪声的角度,应当避免较大的计算频带宽,尤其是高频截止频率( $f_U$ )不应选择过大,否则由于高频段信噪比的降低将导致  $\kappa$  明显偏离实际值。

图 8 展示了本研究选用的记录与记录前噪声的

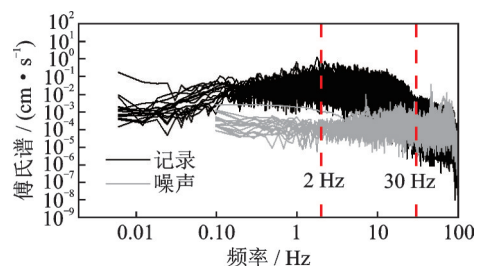


图 8 本研究选用记录与其噪声的对比  
Fig. 8 Comparison of records and noises

对比。从图 8 中可得:(1)大部分记录在 2~30 Hz 频率区间信噪比较高,能较好地用于计算  $\kappa$ ; (2)图 8 展示了当多数泸定地震记录的频率高于 30 Hz 时,噪声对记录影响变得不可忽略。为了确保研究的可靠性,本研究认为使用此次泸定地震记录的傅氏谱计算  $\kappa$  值,截止频率( $f_c$ )不应高于 30 Hz。

## 5 结 论

选择泸定地震 20 个震中距在 16~150 km 的台站的水平向记录进行了场地高频衰减因子的研究,由于原始傅氏谱“尖点”过多导致无法准确识别高频衰减起止频率,通过帕曾窗对傅氏谱进行平滑处理,选择 12 个不同窗宽的帕曾窗,对平滑效果进行了对比,经 0.4 Hz 窗宽的帕曾窗处理后,傅氏谱的可识别性得到提高,能够较准确地进行场地高频衰减因子的计算,最后与其他研究进行了对比,得出如下结论:

(1)随着窗宽的增大,平滑度逐渐提高,尖点被平滑;但窗宽达到 1 Hz 以上后,平滑曲线过度偏离原始谱;窗宽过小无法消除尖点,尤其是窗宽在 0.3 Hz 以下时,大部分尖点依然存在,计算的高频衰减因数不够稳定,拟合优度  $R^2$  较低,均方根误差 ( $rmse$ ) 较高。

(2)0.4 Hz 窗宽的拟合优度 ( $R^2$ ) 相比 0.1~0.3 Hz 窗宽得到较大提高,同时均方根误差 ( $rmse$ ) 下降较快,因此选择 0.4 Hz 的窗宽能较大限度地保留原始谱特征,同时能够消除尖点,提高计算的稳定性,因此推荐使用 0.4 Hz 窗宽的帕曾窗对泸定地震记录的傅氏谱进行平滑。

(3)东西向和南北向记录的  $\kappa$  的变化趋势有明显的差异,随着震中距的增加,东西向  $\kappa$  明显增加;随着  $PGA$  的增加,东西向  $\kappa$  明显减小,根据计算可得泸定地震的  $\kappa$  取值范围为 20~80 ms,由于泸定地震为走滑型的震源机制且断层的走向接近南北向,造成了随震中距的增加东西向衰减更明显, $\kappa$  有明显的方向性。

(4)本研究与傅磊等<sup>[25]</sup>的研究选择的频率范围和计算的结果均较为接近,SUN 等<sup>[24]</sup>的研究与本研究相比,其基于汶川主震的记录选择的截止频率高于本研究的取值,造成了计算结果的较大差异。本研究基于减小噪声干扰的原因,认为使用泸定地震数据计算  $\kappa$ ,截止频率不应高于 30 Hz。

### 参考文献:

[1] 王海云. 近场强地震动预测的有限断层震源模型[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2004.

WANG Haiyun. Finite fault source model for predicting near-field strong ground motion [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2004.

[2] BOORE D M. Simulation of ground motion using the stochastic method[J]. Pure and Applied Geophysics, 2003, 160(3): 635-676.

[3] 王海云,李强.震后近断层震动图的快速产出研究——以 2022 年 1 月 8 日青海门源地震为例[J].世界地震工程, 2022, 38(2): 1-9.

WANG Haiyun. LI Qiang. Study on rapid generation of near-fault Shakemaps after an earthquake: a case of Menyuan earthquake on January 8, 2022, Qinghai Province [J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(2): 1-9.

[4] BRUNE J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75: 4997-5009.

[5] HANKS T C.  $f_{max}$  [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982, 72(6): 1867-1879.

[6] 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): 1969-1993.

[7] HOUGH S E, ANDERSON J G. High-frequency spectra observed at Anza, California: implications for Q structure[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988, 78(2): 692-707.

[8] ANDERSON J G. A preliminary descriptive model for the distance dependence of the spectral decay parameter in Southern California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1991, 80(6): 2186-2193.

[9] ANDERSON J G, HUMPHREY J R Jr. A least squares method for objective determination of earthquake source parameters[J]. Seismological Research Letters, 1991, 62(3): 201-209.

[10] ATKINSON G M, SILVA W. An empirical study of earthquake source spectra for California earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(1): 97-113.

[11] TSAI C C P, CHEN K C. A model for the high-cut process of strong motion accelerations in terms of distance, magnitude, and site condition: an example from the SMART 1 array, Lotung, Taiwan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(1): 1535-1542.

[12] HOUTTE C V, DROUET S, COTTON F. Analysis of the origins of  $\kappa$  (Kappa) to compute hard rock to rock adjustment factors for GMPEs[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(6): 2926-2941.

[13] FRANKEL A, CARVER D, CRANSWICK E. Site response for Seattle and source parameters of earth-



- quakes in the Puget Sound Region[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(2): 468-483.
- [14] MOTAZEDIAN D. Region-specific key seismic parameters for earthquakes in Northern Iran[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(4): 1383-1395.
- [15] DROUET S, COTTON F, GUÉGUEN P.  $V_{s30}$ ,  $\kappa$ , regional attenuation and  $M_w$  from accelerograms: application to magnitude 3—5 French earthquakes[J]. Geophysical Journal International, 2010, 182(2): 880-898.
- [16] AL ATIK L, KOTTKE A, ABRAHAMSON N. Kappa ( $\kappa$ ) scaling of ground-motion prediction equations using an inverse random vibration theory approach[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 104(1): 336-346.
- [17] OTH A, BINDI D, PAROLAI S. Spectral analysis of K-NET and KiK-net data in Japan, part II: on attenuation characteristics, source spectra, and site response of borehole and surface stations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(2): 667-687.
- [18] EDWARDS B, FÄH D, GIARDINI D. Attenuation of seismic shear wave energy in Switzerland[J]. Geophysical Journal International, 2011, 185(2): 967-984.
- [19] KILB D, BIASI G, ANDERSON J, et al. A comparison of spectral parameter Kappa from small and moderate earthquakes using Southern California Anza seismic network data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(1): 284-300.
- [20] HOUTTE C V, K TENIDOU O J, LARKIN T, et al. Hard-site  $\kappa_0$  (Kappa) calculations for Christchurch, New Zealand, and comparison with local ground-motion prediction models[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(4): 1899-1913.
- [21] PERRON V, HOLLENDER F, BARD P Y, et al. Robustness of  $\kappa_0$  measurement: insight from a site-specific study in the low-to-moderate seismicity context of Southeastern France[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 107(5): 2272-2292.
- [22] CAMPBELL K W. Estimates of shear-wave Q and  $\kappa_0$  for unconsolidated and semiconsolidated sediments in Eastern North America[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(4): 2365-2392.
- [23] K TENIDOU O J, ABRAHAMSON N A, SILVA W J, et al. The search for hard-rock Kappa ( $\kappa$ ) in NGA-East: a semi-automated method for large, challenging datasets in stable continental regions[J]. Earthquake Spectra, 2021, 37(1): 1391-1419.
- [24] SUN X, TAO X, DUAN S, et al. Kappa ( $\kappa$ ) derived from accelerograms recorded in the 2008 Wenchuan mainshock, Sichuan, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 73: 306-316.
- [25] 傅磊, 李小军. 龙门山地区的 kappa( $\kappa_0$ )模型及汶川  $M_s8.0$  地震的强地震动模拟[J]. 地球物理学报, 2017, 60(8): 2935-2947.
- FU Lei, LI Xiaojun. The kappa( $\kappa_0$ ) model of the longmenshan region and its application to simulation of strong ground-motion by the Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake[J]. Chinese Journal Geophysics, 2017, 60(8): 2935-2947.
- [26] 傅磊, 李小军, 陈苏. 云南地区高频衰减参数特性初步研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(6): 1294-1307.
- FU Lei, LI Xiaojun, CHEN Su. A preliminary study of the characteristics of high-frequency attenuation parameter in Yunnan[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(6): 1294-1307.
- [27] GÜLÜM T, ÜMIT D. Variation of high frequency spectral attenuation (Kappa) in vertical arrays[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 113: 406-414.
- [28] 大崎顺彦. 地震动的谱分析入门[M]. 田琪, 译. 北京: 地震出版社, 2008.
- YORIIHIKO Ohsaki. Introduction to Spectral Analysis of Ground Motion[M]. Beijing: Seismological Press, 2008.
- [29] K TENIDOU O J, GELIS C, BONILLA L F. A study on the variability of Kappa ( $\kappa$ ) in a borehole: implications of computation process[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(2): 1048-1068.
- [30] TRIFUNAC M D. Q and high-frequency strong motion spectra[J]. Soil Dynamics Earthquake Engineering, 1994, 13: 149-161.
- [31] K TENIDOU O J, COTTON F, ABRAHAMSON N A, et al. Taxonomy of  $\kappa$ : a review of definitions and estimation approaches targeted to applications[J]. Seismological Research Letters, 2014, 85(1): 135-146.
- [32] PURVANCE M D, ANDERSON J G. A comprehensive study of the observed spectral decay in strong-motion accelerations recorded in Guerrero, Mexico[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(2): 600-611.
- [33] PALMER S M, ATKINSON G M. The high-frequency decay slope of spectra (Kappa) for  $M \geq 3.5$  earthquakes on rock sites in Eastern and Western Canada[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2020, 110(2): 1-18.
- [34] SONNEMANN T, HALLDORSSON B, JONSSON S. Automatic estimation of earthquake high-frequency strong-motion spectral decay in South Iceland[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 125(10): 105676.

- [35] DOUGLAS J, GEHL P, BONILLA L F, et al. A  $\kappa$  model for mainland France[J]. Pure & Applied Geophysics, 2010, 167(11): 1303-1315.
- [36] 李萍萍, 江鹏, 李同林, 等. 2021年9月16日四川泸县  $M_s$ 6.0地震强地面运动特征分析[J]. 地震学报, 2022, 44(2): 260-270.  
LI Pingping, JIANG Peng, LI Tonglin, et al. The strong ground motion characteristics of  $M_s$ 6.0 Luxian, Sichuan, earthquake on 16 September 2021[J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44(2): 260-270.
- [37] 喻焜, 李小军. 四川、甘肃地区  $V_{s30}$  经验估计研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 525-533.  
YU Tian, LI Xiaojun. Empirical estimation of  $V_{s30}$  in the Sichuan and Gansu Provinces[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 525-533.
- [38] BENJAMIN E, DONAT F, DOMENICO G. Attenuation of seismic shear wave energy in Switzerland[J]. Geophysical Journal International, 2011, 185(2): 967-984.
- [39] MARGARIS B N, BOORE D M. Determination of  $\Delta\sigma$  and  $\kappa_0$  from response spectra of large earthquakes in Greece[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998, 88(1): 170-182.
- [40] JI Chunyang, CABAS A, BONILLA L F, et al. Effects of nonlinear soil behavior on Kappa ( $\kappa$ ): observations from the KiK-Net database[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2021, 111(4): 2138-2157.

## A study of Kappa parameter ( $\kappa$ ) of Luding $M_s$ 6.8 strong ground motion records

ZHANG Xiao-nan<sup>1,2</sup>, WANG Hai-yun<sup>1,2</sup>, LI Qiang<sup>1,2</sup>, BAI Yun-peng<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** Ground motion simulation can provide reference for buildings seismic design in areas lacking earthquake records. High frequency attenuating factor ( $\kappa$ ) is an important parameter in ground motion simulation, controlling the drop of Fourier spectrum shape in the high frequency interval. Luring magnitude 6.8 earthquake records within 150 km of the epicenter are selected to develop  $\kappa$ . Parzen window is used to smooth the cluttered Fourier amplitude spectrums (FAS). The frequency interval in FAS with the smallest  $p^H$  function is selected to fit the  $\kappa$ . The approach improves accuracy of identifying lowest and upper frequency, and the stability of the calculation.  $\kappa$  are calculated based on 20 stations of horizontal records and the distribution trend of  $\kappa$  is analyzed. The results show that FAS is gradually smooth with the increase of the window width, and it is significantly different from the original spectrum when the window width is larger than 1 Hz. Compared with 12 window widths, the window width of 0.4 Hz is the best. The window of 0.4 Hz width makes the curve smooth and the error of  $\kappa$  small. There is a significant directional difference in  $\kappa$  distribution.  $\kappa$  in EW direction increases with respect to epicenter distance, and  $\kappa$  in NS direction decreases with respect to PGA.

**Key words:** ground motion; high-frequency attenuating factor; Parzen window; Fourier amplitude spectrums; Luding earthquake

**作者简介:** 张潇男(1994—),男,博士研究生。E-mail: zhangxn19941005@163.com。

**通讯作者:** 王海云(1964—),男,博士,研究员。E-mail: haiyun@iem.ac.cn。