

高频衰减参数(k)的研究

——以伊朗强震数据为例

包金哲¹, 张鹏程^{2*}, 王树波¹, 张帆¹

¹内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特

²呼和浩特玉泉区应急管理局, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2022年8月3日; 录用日期: 2022年9月1日; 发布日期: 2022年9月8日

摘要

Kappa (k)值参数是控制高频率地面震动的一个重要参数, 该参数是加速度傅里叶谱在一定频率范围内线性对数尺度上的线性衰减因子, 表示高频能量的衰减范围。该参数通过随机方法作为模拟强地震动的关键输入。本研究旨在估算伊朗西部高地地震活动性地区的kappa参数。因此, 我们使用了1973年至2018年期间记录的10次参考地震和76次加速度记录, 包括2017年11月12日克尔曼沙发生的7.3级Ezgeleh地震。为提高计算精度, 在伊朗最新的地震构造分区图中导出了 k , k 方程只考虑了在同一区域发生的参考地震和加速度记录。分别计算每个水平分量 k 值的均值。然后, 分别计算并分析了各地震带 k 值与距离的线性关系。并提出了各区域的累积方程。给出的方程表明, 近地表衰减参数 k_0 伊朗西部地震带的变化范围为0.0331~0.0398。利用该参数可以有效地用综合方法计算该区的强地震动。

关键词

谱衰减参数(k), 伊朗西部地震省, 距离效应, 加速度, 傅里叶谱加速度

Study on the High Frequency Attenuation Parameter (k)

—A Case Study of Strong Earthquake Data in Iran

Jinze Bao¹, Pengcheng Zhang^{2*}, Shubo Wang¹, Fan Zhang¹

¹Inner Mongolia Seismological Bureau, Hohhot Inner Mongolia

²Yuquan District Emergency Management Bureau of Hohhot, Hohhot Inner Mongolia

Received: Aug. 3rd, 2022; accepted: Sep. 1st, 2022; published: Sep. 8th, 2022

*通讯作者。

Abstract

An important parameter that controls strong ground motion at high frequencies (higher than 1 Hz) is the spectral decay or kappa (k) parameter. This parameter is a linear decay factor for Fourier spectrum of acceleration on a linear-logarithmic scale within a certain frequency range, which indicates the range of attenuation of high frequency energy. This parameter is used as a key input for the simulation of strong ground motion through a random method. This study aims to estimate the kappa parameter for the west of Iran that has a high seismic activity. Hence 10 reference earthquakes as well as 76 accelerograms recorded from 1973 until 2018 are used, including the 7.3-magnitude Ezgeleh, Kermanshah earthquake on November 12, 2017. The k is derived for the latest seismotectonic zoning map of Iran to enhance the accuracy of calculations and only the records in which the reference earthquake and accelerograms occurred in the same zone are considered in the k equation. The k parameter is calculated separately for each horizontal component and for the mean. Then, the linear relationships between the kappa and distance are separately calculated and analyzed for each seismic zone. An accumulative equation is also proposed for all zones. The presented equations indicate that the near surface attenuation parameter k_0 for the west seismic zones of Iran varies from 0.0331 to 0.0398. This parameter can be used effectively to calculate the strong ground motion in the zones using synthetic methods.

Keywords

Spectral Decay Parameter (k), Western Seismic Province of Iran, Distance Effect, Acceleration, Fourier Spectral Acceleration

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高频衰减参数 k 是利用综合方法模拟地面强震动关键性的输入参数, 它作为地面运动预测方程的主要参数之一, 被应用在地面运动强震动数据不充足的区域。高频衰减参数 kappa 值被 Anderson 和 Hough [1] 提出后, 国内外众多学者对 kappa 值的研究颇多, Ktenidou 利用希腊 Thessaloniki 附近的 EUROSEISTEST 沉积谷布设的 14 个地表台站和 6 个井下台站的地震数据, 采用经典的反应谱法计算出 k_0 , 并将其分割成局部场地衰减和区域场地衰减两部分。局部场地衰减为 k_0 值, 区域衰减包括沿射线路径的材料阻尼的衰减, 还有中小尺度的散射引起的衰减两部分, 研究发现波速高值地区存在稳定的 k_0 , 模型得出 k_0 出与 V_{S30} 存在线性关系, 拟合优度值为 47%, 估算出等效 Q 值为 590 [2]; 李文倩对华北地区近 2000 条数据, 用 Anderson 和 Hough 提出的经典算法得到 kappa 值, 认为与震级和震源深度无关, 但离散性较大[3]; 包金哲对鄂尔多斯东北缘地区进行研究, 发现 kappa 值与震中距存在明显线性关系[4], 确定地面运动的频率一个适当的方法是通过使用傅里叶谱的振动频率范围[5]。这个频谱显示了地面运动的重要性质。在地震工程中, 岩土振动波的频率含量分析无论是在分析、设计部分都具有重要的意义, 图 1 显示了(Sarpol-e-Zahab 站)在横轴和纵轴上的对数尺度加速度图的傅里叶谱。加速度傅里叶谱具有独特的特性, 被众多学者研究, Hanks 在上述尺度上对大量的傅里叶谱进行了研究, 认为从第一个转角频率(左边)开始有一个相对水平的截面称为 f_0 或 f_c , 到第二个角的频率 f_{max} 加速度的

傅里叶振幅谱急剧下降[6]。

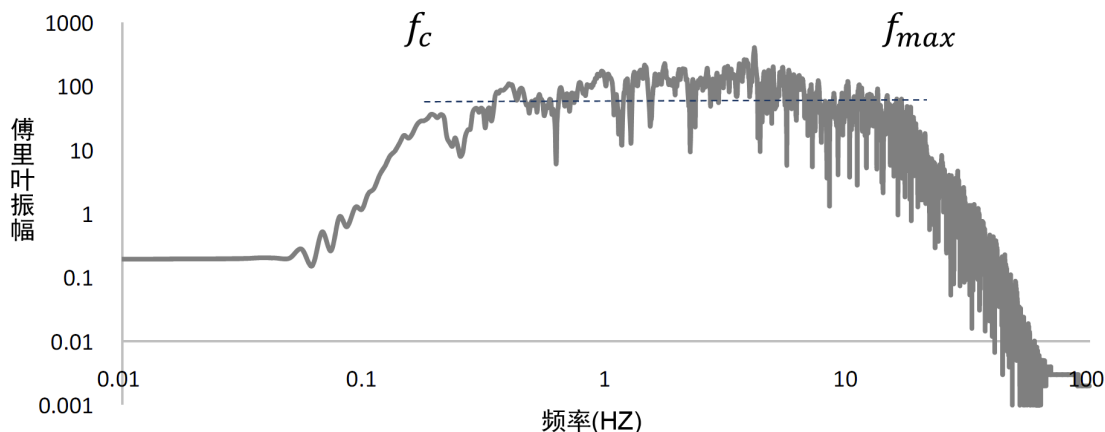


Figure 1. Fourier spectrum of acceleration recorded at Sarpol-e-Zahab station during Ezgeleh earthquake
图 1. Sarpol-e-Zahab 台站记录 Ezgeleh 地震加速度记录的傅氏谱

下降趋势从 f_c 开始, 这一过程在其他光谱的更高频率上发生。Anderson 和 Hough [1] 引入了 f_E 和 f_x 分别为加速度傅里叶谱快速下降的起点和终点。图 2 和图 3 显示了在 Sarpol-e-Zahab 站用 f_E , f_x 和 f_c 点显示在一个线性对数尺度随噪声范围。这幅图说明了振幅是如何随着频率的增加而减小的, 这表明对于低波长或高频率的波, 加速度减小。振幅继续下降然后停滞在一个稳定的范围内。在某种情况下下降趋势从 f_c 开始, 这一过程在其他光谱的更高频率上发生。应该注意的是 f_{max} 和 f_E 是内在的和视觉的。当点 f_E 和 f_x 来考虑傅里叶频谱衰减线性范围的点时, 用最小二乘法对所选范围内的振幅谱点进行直线拟合; 所以这条线的斜率代表了 κ 参数。当频率由低到高变化时, 振幅有均匀的线性下降, 在较高频率时由于噪声而趋于平稳, 因此, 有必要通过合适的低通滤波器(LPF)来消除这部分频谱。由于点 f_c 和 f_x 对 k 的估计是经验的, 结果不可避免地存在一定的误差。

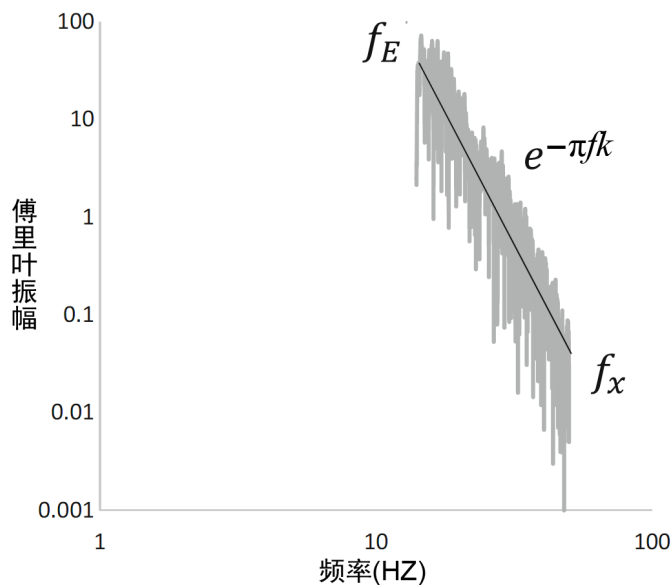


Figure 2. Fourier amplitude spectrum (L) of acceleration recorded at Sarpol-e-Zahab station during Ezgeleh earthquake on linear-logarithmic scale; f_E low frequency and f_x high frequency

图 2. Sarpol-e-Zahab 站记录的 Ezgeleh 地震加速度水平分量的傅里叶振幅谱(L)是线性对数坐标下; f_E 低频点, f_x 高频点

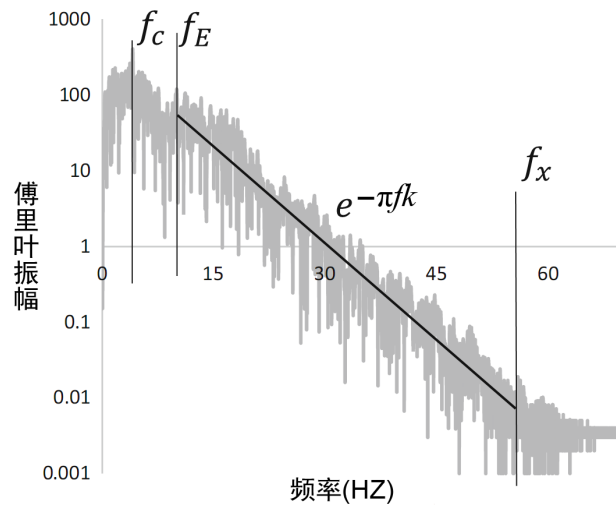


Figure 3. Fourier amplitude spectrum of horizontal component of acceleration (L) recorded at Sarporl-e-Zahab station on linear-logarithmic scale

图 3. Sarporl-e-Zahab 台站在线性对数坐标下加速度记录水平分量(L)傅里叶振幅谱

Anderson 和 Hough 研究了许多加速度的傅里叶谱, 得出结论是加速度的傅里叶谱在 f_E 和 f_x 可以用下式表示[1]:

$$a(f) = A_0 e^{-\pi f/k}, \quad f > f_E \quad (1)$$

其中 f 是频率, k 是谱衰减参数, A_0 这取决于震源性质、土壤类型、震级、断层的震源机制、剪切波速、震中距离以及其他因素。由于 k 广泛用于地震指标的计算, 如合成地震动图的估算, 因此可以利用式(1)和研究区记录的加速度图进行估算。

2. 文献综述与研究方法

Kappa 是利用地震仪频率估计谱幅值的参数; 所以它的低值代表高频频谱的衰减, 而它的高值代表高频能量的去除。因此, 一个区域的衰减能力是估计其强地震动的关键。Hanks 首次尝试对该参数进行建模[7], 2年后 Anderson 和 Hough [1]将该参数引入频谱衰减或 kappa 参数。在他们的大量研究中, 他们发现弹性回弹源模型的必然结果是加速度谱随着 ω^2 的增大而增大, 频率较低, 距离故障足够远。总的来说, Anderson 和 Hough [1]和 Drouet 等提出了两种计算 kappa 值参数的方法[8]:

- 1) 剪切(S)波谱的直接测量[1]。
- 2) 直接测量来自源 - 路径 - 站点反演的站点函数[9]。

Cormier 提出了用射线模拟地震相位的衰减时间如下[9]:

$$t^* = \int \frac{d_r}{Q_\beta(r)\beta(r)} \quad (2)$$

其中 $\beta(r)$ 为横波速度, $Q_\beta(r)$ 为横波衰减品质因子。Anderson 和 Hough 认为, 将源的光谱行为转化为加速度, 并结合衰减的影响, 会引导高频下的光谱形状:

$$a(f) = A_0^* e^{-\pi f t^*} \quad (3)$$

比较方程式。(1)、(3), 单层地球模型的谱衰减参数(k)为:

$$k = \int \frac{d_s}{Q \times \beta} \quad (4)$$

式 4 根据近地表和深剖面两种模式进行划分:

$$k = \frac{L_c}{Q(f) \times \beta_c} + \frac{h_s}{Q_s \times \beta_s} \quad (5)$$

L_c 是地震射线路径的总长度, h_s 是表层厚度, Q_s 是表层品质因子, β_c 是表层波速。(5)式中, kappa 值等式中左半部分表示, kappa 值随着源距离的增大而增大, 右半部分表示, 土层的非线性效应。

Anderson 和 Hough [1]和 Castro *et al.* (2000)认为 kappa 参数依赖于射线路径和震中距离。Castro 等在意大利 Umbria-Marche 地区提出 kappa 参数在 70~80 km 距离范围内增大, 在 70~100 km 距离范围内减小 [10]。这些显示 kappa 值不仅依赖基岩的类型, 还依赖近地场的破坏程度和基岩的侵蚀程度。Douglas 等人研究岩石和软土地地的 kappa 参数。证明了岩石场地的 kappa 参数小于软土地地的 kappa 参数; 他们还确定了高山地区的岩石场地的 kappa 参数, 这与前人的研究是相符的[11]。

通过表 1, 一些研究学者在 kappa 值的不同区域被提出和比较。

Table 1. Kappa values for different regions
表 1. 不同区域的 kappa 值

No	Researchers	Year	Region	Kappa values range
1	Anderson and Hough	1984	California	Alluvium: $k = 0.066 s + (0.000126 s/km^{-1})R$ consolidated sediments: $k = 0.065 s + (0.000172 s/km^{-1})R$ rock: $k = 0.040 s + (0.000380 s/km^{-1})R$
2	Hatzidimitriou <i>et al.</i>	1993	Greece	$K_{0average} = 0.057$
3	Castro <i>et al.</i>	1996	Friuil, Italy	$K_{0average} = 0.03$
4	Hough <i>et al.</i>	1988	Anza array in southern California	$k_0 = 0.0003 \approx 0.0181$
5	Bay <i>et al.</i>	2003	Switzerland	$k_0 = 0.015$
6	Ghasemi <i>et al.</i>	2003	Bam, Iran	$k = 0.0187 + 0.0004R_{epi}$ ($R^2 = 0.603$)
7	Bay <i>et al.</i>	2005	Switzerland	$k_0 = 0.0125$
8	Morasca <i>et al.</i>	2006	Western Alps	$k_0 = 0.012$
9	Douglas <i>et al.</i>	2010	Mainland France	$k_{rock} = 0.0207 + 0.000175R_{epi}$
10	Ktenidou <i>et al.</i>	2013	Aegion, southwestern part of the Gulf of Corinth Greece	$k_{soil} = 0.0270 + 0.000175R_{epi}$
11	Ktenidou <i>et al.</i>	2015	EUROSEISTEST valley, Northern Greece	Station at the valley centre $k_{as} = 0.061 + 0.00048R_e \pm 0.011$ ($R^2 = 0.78$) Downhole stations; $k_{r,as} = 0.021 + 0.00048R_e \pm 0.008$ ($R^2 = 0.47$)
12	Samaei <i>et al.</i>	2016	Ahar-Varzagchan, Iran	$k(R) = \begin{cases} 0.043 & R \leq 40(\text{km}) \\ 0.0126 + 0.00076R & 40 \leq R \leq 130(\text{km}) \\ -0.055 + 0.00128R & R \geq 130(\text{km}) \end{cases}$
13	Kumar <i>et al.</i>	2018	Western India	Epicentral distance: $k_e = 0.0208 + 0.00004458R_{epi}$ Hypocentral distance: $k_h = 0.0381 + 0.00009021R_{hip}$

3. 伊朗西部的 Kappa 值参数的估算

伊朗幅员辽阔，包括各种地质和地震带。伊朗西部也由不同的地震带组成，计算整个区域的 k 值将导致误差，因为 $kappa$ 值在断层边界变化是非常明显的，虽然地震完全影响到了他们周围的地区，包括不同的区域。作者认为应该仔细独立计算每个区域的 $kappa$ 值参数，如果有多种地震带。通过对每个地震带进行适当的换算，通过在震源和不同 $kappa$ 参数的几个不同区域的台站之间产生合成的加速度记录。因此，本研究利用最新研究初步确定了位于伊朗西部的地震带[12]。然后根据每个地震带发生的地震及在同一地震带的地震记录计算 $kappa$ 结合伊朗最新的地震构造分区图如图 4 所示。从图中可以看出，伊朗西部包括 15、16、25 地震带。Karimiparidari 等人提出了伊朗新的地震构造分区图，它是基于最新的活动构造、地形、磁强和地震活动目录数据开发的地震带地图，地震发生在这些地区和他们的地震记录覆盖使用 GIS 软件[12]。然后，通过估算模块把每一个地震带众多地震符合要求的每一个地震记录分离。结果显示，15 区发生 4 次地震，29 条加速度记录。16 区发生 5 次地震，42 条加速度记录，25 区发生 1 次地震 5 条加速度记录。图 5 为伊朗西部的地震构造分区图，其中列出了每个地震带的地震和台站。

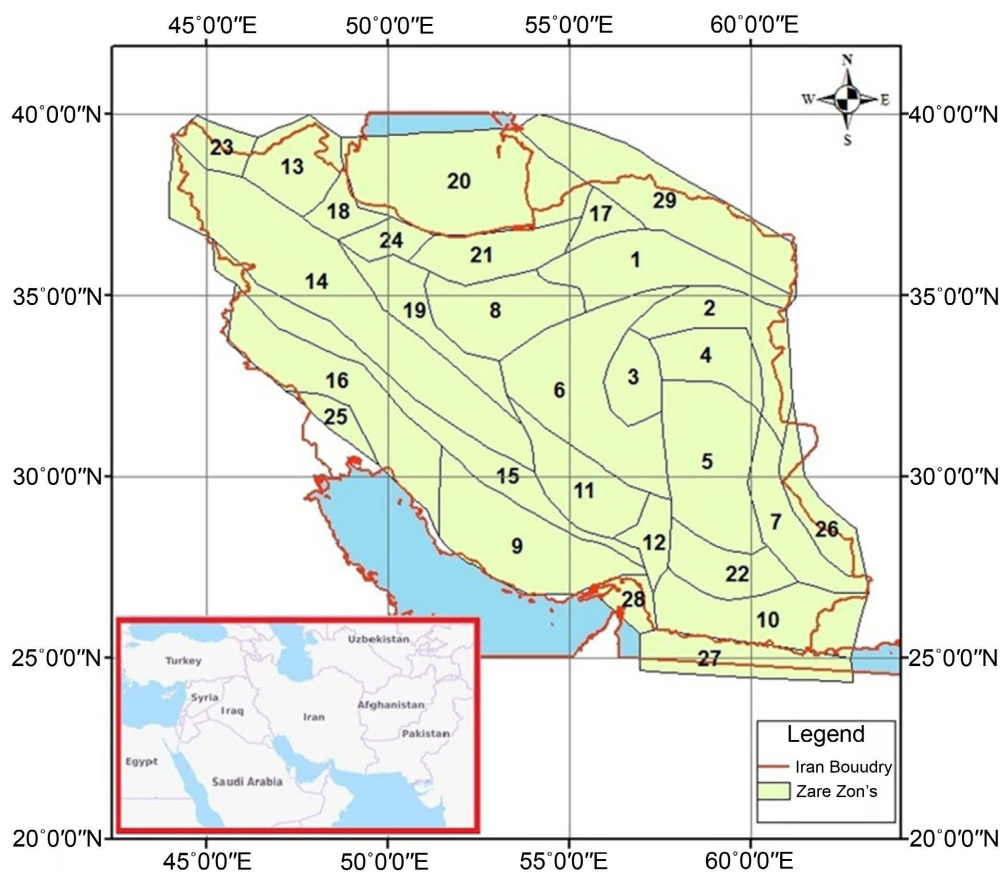


Figure 4. The latest seismic zoning of Iran (Karimiparidari *et al.* 2011)

图 4. 伊朗最新的地震区划(Karimiparidari *et al.* 2011)

由于小于里氏 5 级的地震引起的加速度会在短时间内消散，因此，在这项研究中使用了更大的地震，表 2、表 3 和表 4 分别列出了第 15、16 和 25 地震带所使用的地震目录及相应记录。由于这些地震对应于不同的震级尺度，下面的方程将不同震级转化为矩阵级。

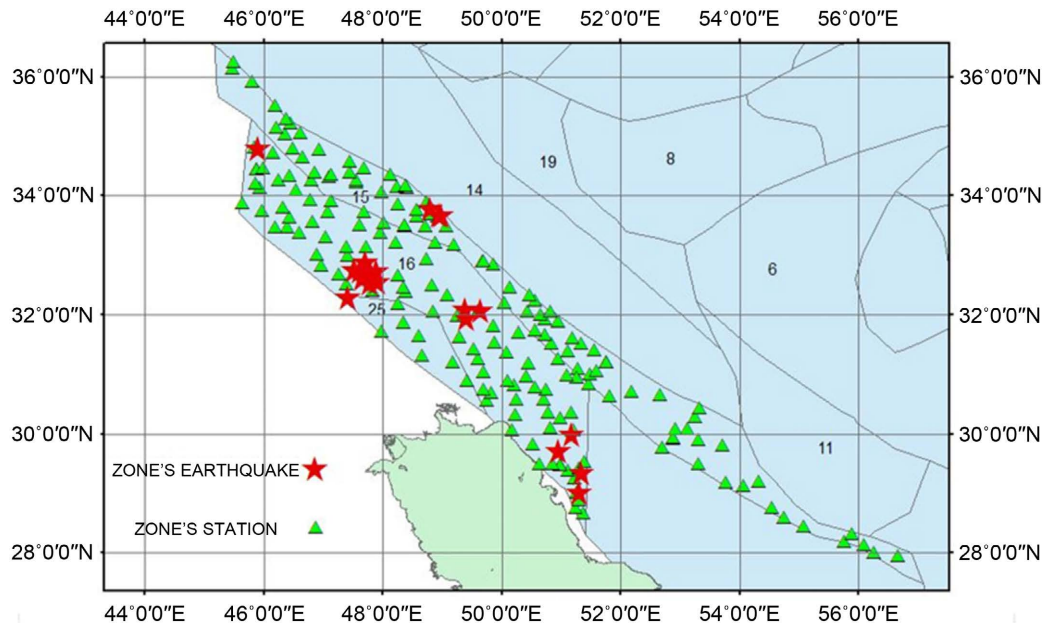


Figure 5. Seismotectonic zoning map of the west of Iran as well as accelerometers stations and earthquakes in the west
图 5. 伊朗西部的地震构造分区图以及西部的地区地震和加速度计台站分布图

$$M_w = 0.066M_s + 2.11, 2.8 \leq M_s \leq 6.2, (\text{Erdik et al. 2012}) \quad (6)$$

$$M_w = 0.93M_s + 0.45, 6.2 \leq M_s \leq 8.2, (\text{Erdik et al. 2012}) \quad (7)$$

$$M_w = 0.85M_s + 1.03, 3.5 \leq M_b \leq 6.2, (\text{Scordilis et al. 2006}) \quad (8)$$

$$M_w = 3.73L_n M_s - 0.51, 3.5 \leq M_L \leq 6.2, (\text{Shoja-taheri 2007}) \quad (9)$$

$$M_N = 0.9177M_L + 0.619, (\text{Emami et al. 2014}) \quad (10)$$

我们使用 SeismoSignal 软件对研究记录进行基线校正和噪声去除[13]。因此，选择 0.2~25 Hz 之间的频率，其余的频率进行滤波。图 6 和图 7 显示了 2017 年 11 月 12 日 Sarpol-e-Zahab 站 Ezgeleh 地震的水平分量校正前后的加速度记录。

然后计算每个记录未旋转水平分量(L, T)的加速度傅里叶谱。加速度曲线的傅里叶谱梯度表示频谱衰减或 kappa (k)参数，水平轴表示频率(十进制刻度)和垂直轴表示傅里叶振幅谱(在对数坐标系上)，将等式(1)两边同时取自然对数，计算出 k ：

$$\ln(A(f)) = \ln(A_0) - \pi f k \quad (11)$$

根据式(11)，采用最小二乘法对低频和高频范围内的每个傅里叶振幅谱进行一阶曲线拟合。 k 的值可以用下式的线性部分计算。由于每个加速度计有两个水平分量 L 和 T，所以每个分量的 k 分别计算，每个记录取平均值。这个参数是计算

$$k = -\frac{\lambda}{\pi} \quad (12)$$

式(12)中， λ 是最佳线性拟合的斜率在频率 f_E 和 f_s 之间。由于每个加速度记录谱有两个水平分量 L 和 T，所以每个分量的 K 的分别计算，每个记录取平均值。这个参数是计算所有地震带区域内所有地震记录(两个水平分量)清单见表 2、表 3 和表 4 中，为了计算和确定 kappa 值对震中距离(R)的依赖关系。还计算了台站与相应的地震位置距离，并列于表中， K 与 R 之间的关系一般可以用各区域所有记录的均值 K 与对应 R 之间的线性回归来表示：

$$K = m \cdot R + k_0 \quad (13)$$

在式(13) R 是震中距和 k_0 和 m 是不变量。 k_0 是被认为独立台站相关和近地表衰减有关, 在场地下方几公里处, 而 m 被认为是区域独立的和区域衰减相关的[1]。

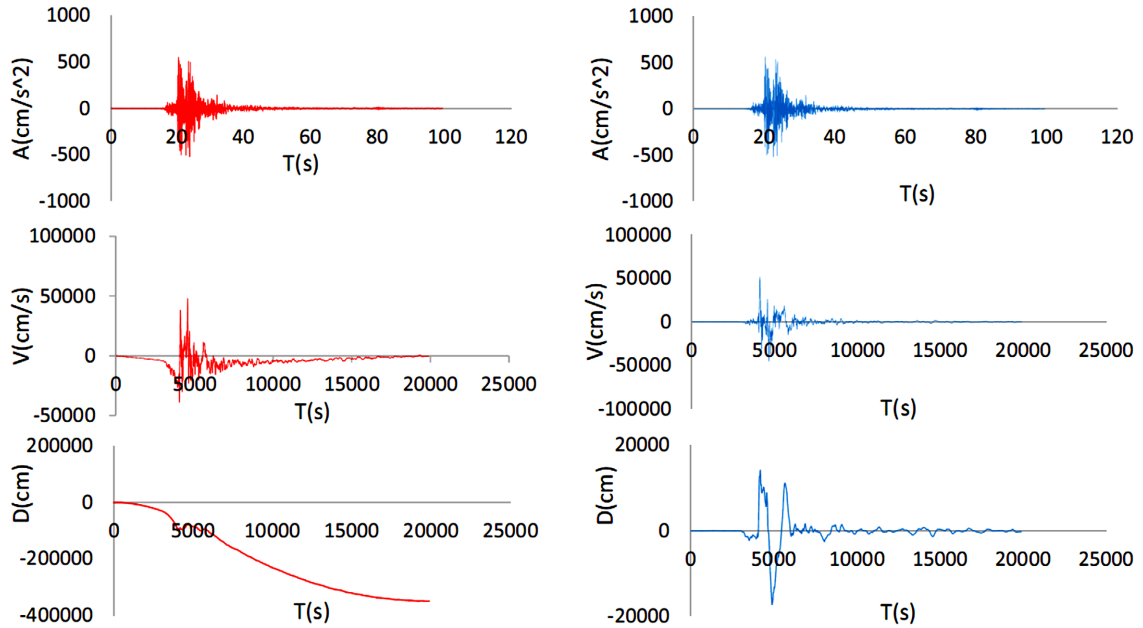


Figure 6. Corrected (blue) and non-corrected (red) acceleration time series, velocity and displacement of component (T) at Sarpol-e-Zahab station

图 6. Sarpol-e-Zahab 台站的 T 分量的记录(蓝色为校正后, 红色为未矫正)加速度 - 时程、速度 - 时程、位移 - 时程曲线

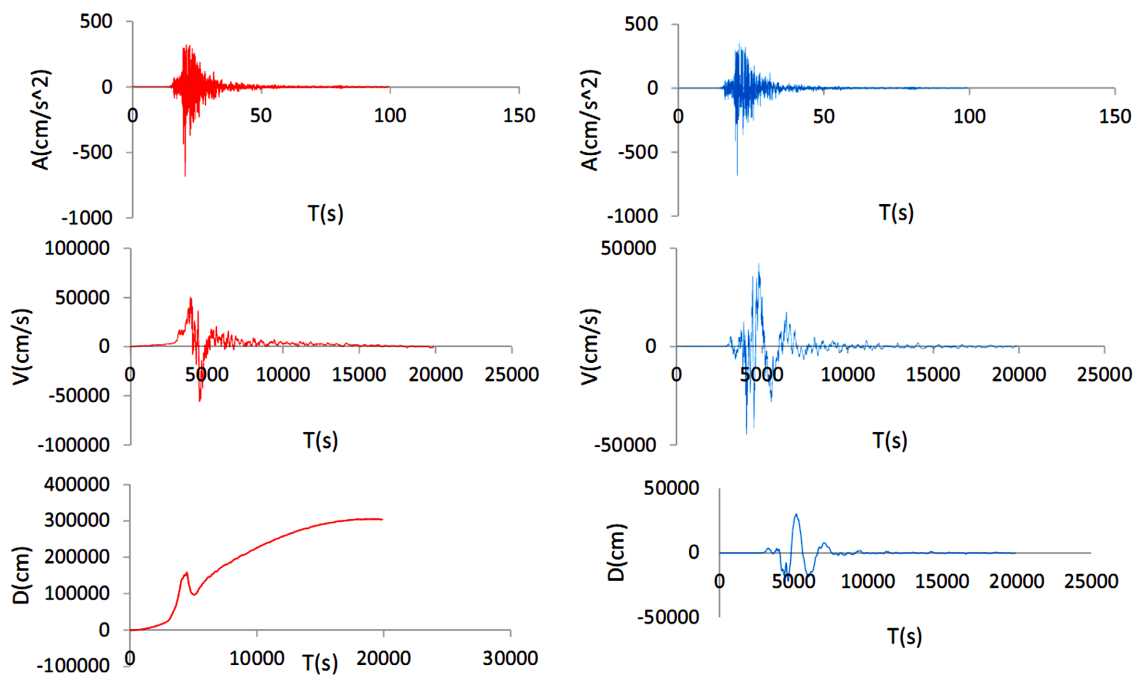


Figure 7. Corrected (blue) and non-corrected (red) acceleration time series, velocity and displacement of component (L) at Sarpol-e-Zahab station

图 7. Sarpol-e-Zahab 台站的 L 分量的记录(蓝色为校正后, 红色为未矫正)加速度 - 时程、速度 - 时程、位移 - 时程曲线

Table 2. Kappa values (k) for horizontal components L and T and their mean for zone No. 15
表 2. 15 号区域水平分量 L、T 的 kappa 值及其均值

NO.	Station	Earthquake name	Record's number	Date mm/dd/yyyy	Epicenrer dis (km)	Mw	Kappa (L)	Kappa (T)	Kappa (mean)
1	Sarpolezahab	Ezgeleh	7313	11/12/2017	39	7.3	0.056	0.063	0.0595
2	Kerend	Ezgeleh	7302	11/12/2017	66	7.3	0.0515	0.0517	0.0516
3	Eslamabadqarb	Ezgeleh	7313	11/12/2017	96	7.3	0.0602	0.049	0.0546
4	Soomar	Ezgeleh	7375	11/12/2017	106	7.3	0.707	0.06	0.3835
5	Homail	Ezgeleh	7294	11/12/2017	125	7.3	0.085	0.083	0.084
6	Ilam1	Ezgeleh	7341	11/12/2017	138	7.3	0.0707	0.07	0.07035
7	Loomar	Ezgeleh	7385	11/12/2017	161	7.3	0.066	0.066	0.066
8	Komijan	Mianzulan	2250	8/21/1998	89	5.1	0.0854	0.073	0.0792
9	Qahavand	Mianzulan	2007	8/21/1998	77	5.1	0.0828	0.07811	0.080455
10	Bahar	Mianzulan	2182	8/21/1998	66	5.1	0.0597	0.0463	0.053
11	Hamedan3	Mianzulan	2190	8/21/1998	53	5.1	0.0435	0.0423	0.0429
12	Kohnoosh	Mianzulan	2210	8/21/1998	51	5.1	0.0495	0.0451	0.0473
13	Toyserkan	Mianzulan	2206	8/21/1998	29	5.1	0.0463	0.044	0.04515
14	Malayer	Mianzulan	2021	8/21/1998	27	5.1	0.0651	0.0574	0.06125
15	Firoozan	Mianzulan	4026	8/21/1998	110	5.1	0.0518	0.0572	0.0545
16	Noor Abad	Silakhor	4024	3/31/2006	104	5.9	0.0675	0.0722	0.06985
17	Giyani	Silakhor	4033	3/31/2006	88	5.9	0.0667	0.0597	0.0632
18	Nahavand	Silakhor	4038	3/31/2006	80	5.9	0.0521	0.0558	0.05395
19	Khoram Abad	Silakhor	4019	3/31/2006	63	5.9	0.0393	0.0532	0.04625
20	Shool Abad	Silakhor	4055	3/31/2006	59	5.9	0.0361	0.0458	0.04095
21	Tooshk-e-Ab-e-Sard	Silakhor	4035	3/31/2006	41	5.9	0.0261	0.0287	0.0274
22	Chaghalvandi	Silakhor	4018	3/31/2006	41	5.9	0.0264	0.034	0.0302
23	Dorood	Silakhor	4022	3/31/2006	23	5.9	0.0312	0.0418	0.0365
24	Chhalan Choolan	Silakhor	4027	3/31/2006	9	5.9	0.027	0.0274	0.0272
25	Konar Takhteh	Baba Monir	5198	3/31/2006	56	5.2	0.0578	0.053	0.0554
26	Dogonbadan	Baba Monir	5196	3/5/2011	55	5.2	0.045	0.0412	0.0431
27	Basht	Baba Monir	5195	3/5/2011	38	5.2	0.0661	0.0511	0.0586
28	Baba Kalan	Baba Monir	5209	3/5/2011	38	5.2	0.0349	0.0417	0.0383
29	Baba Monir	Baba Monir	5194	3/5/2011	8	5.2	0.028	0.0288	0.0284

Table 3. Kappa values (k) for horizontal components L and T and their mean for zone No. 16
表 3. 16 区域 kappa 值的水平分量 L、T 及其平均值

NO.	Station	Earthquake name	Record's number	Date mm/dd/yyyy	Epicenter Dis	Mw	Kappa (L)	Kappa (T)	Kappa (mean)
1	Booshehr5	Dalaki	6076	11/28/2013	72	5.7	0.0604	0.0686	0.0645
2	Bandar-e-Rig	Dalaki	6077	11/28/2013	72	5.7	0.0607	0.0555	0.0581
3	Ali Hoseini	Dalaki	6060	11/28/2013	67	5.7	0.059	0.059	0.059
4	Ahram	Dalaki	6059	11/28/2013	52	5.7	0.0524	0.0482	0.0503

Continued

5	Chehel Zaree	Dalaki	6062	11/28/2013	51	5.7	0.0422	0.0518	0.047
6	Shabankareh	Dalaki	6068	11/28/2013	38	5.7	0.0412	0.0383	0.03975
7	Konar Takhteh	Dalaki	6067	11/28/2013	20	5.7	0.0366	0.0383	0.03745
8	Dalaki	Dalaki	6063	11/28/2013	11	5.7	0.031	0.332	0.1815
9	Shabankareh	DareShur	3245	3/2/2004	61	5.4	0.0577	0.0541	0.0559
10	Booshehr5	DareShur	3235	3/2/2004	50	5.4	0.0455	0.0482	0.04685
11	Booshehr1	DareShur	3255	3/2/2004	47	5.4	0.055	0.034	0.0445
12	Saed Abad	DareShur	3237	3/2/2004	46	5.4	0.0415	0.065	0.05325
13	Ali Hoseini	DareShur	3244	3/2/2004	29	5.4	0.0504	0.0375	0.04395
14	Borazjan	DareShur	3242	3/2/2004	29	5.4	0.0477	0.0511	0.0494
15	Ahram	DareShur	3241	3/2/2004	14	5.4	0.032	0.0504	0.0412
16	Abad	DareShur	3239	3/2/2004	6	5.4	0.0322	0.0282	0.0302
17	Dasht-e-Abbas	Siah Gav	5446	5/3/2012	53	5.5	0.0723	0.0742	0.07325
18	Moosiyani	Siah Gav	5448	5/3/2012	51	5.5	0.0675	0.075	0.07125
19	Dehloran	Siah Gav	5447	5/3/2012	47	5.5	0.0675	0.0667	0.0671
20	Dareh Shahr	Siah Gav	5453	5/3/2012	43	5.5	0.0518	0.0477	0.04975
21	Abdanan	Siah Gav	5452	5/3/2012	31	5.5	0.0402	0.0504	0.0453
22	Pol Dokhtar	Siah Gav	5451	5/3/2012	30	5.5	0.0489	0.0536	0.05125
23	Murmuri	Siah Gav	5449	5/3/2012	17	5.5	0.0383	0.0351	0.0367
24	Sar Dasht	Mormori	6348	10/15/2014	85	5.6	0.1025	0.0732	0.08785
25	Dehloran	Mormori	6344	10/15/2014	65	5.6	0.0781	0.0733	0.0757
26	Moosiyani	Mormori	6346	10/15/2014	52	5.6	0.0703	0.0611	0.0657
27	Dezfool	Mormori	6359	10/15/2014	47	5.6	0.0577	0.0556	0.05665
28	Hosseiniyeh Olya	Mormori	6419	10/15/2014	33	5.6	0.0703	0.0675	0.0689
29	Murmuri	Mormori	6345	10/15/2014	32	5.6	0.0564	0.0585	0.05745
30	Dasht-e-Abbas	Mormori	6350	10/15/2014	18	5.6	0.0402	0.0443	0.04225
31	Eyvan	Mormori	6338	08/18/2014	184	6	0.0927	0.0959	0.0943
32	Saleh Abad	Mormori	6342	08/18/2014	167	6	0.0536	0.0767	0.06515
33	Lali	Mormori	6281	08/18/2014	137	6	0.0694	0.0552	0.0623
34	Sar Dasht	Mormori	6286	08/18/2014	110	6	0.065	0.0834	0.0742
35	Pahle	Mormori	6285	08/18/2014	86	6	0.0722	0.0854	0.0788
36	Bisheh-Deraz	Mormori	6276	08/18/2014	70	6	0.0412	0.044	0.0426
37	Andimeshk	Mormori	6277	08/18/2014	66	6	0.0585	0.0703	0.0644
38	Dareh Shahr	Mormori	6278	08/18/2014	64	6	0.0503	0.0511	0.0507
39	Pol Dokhtar	Mormori	6284	08/18/2014	59	6	0.0518	0.0675	0.05965
40	Hosseiniyeh Olya	Mormori	6311	08/18/2014	55	6	0.0463	0.0431	0.0447
41	Abdanan	Mormori	6275	08/18/2014	48	6	0.0477	0.0494	0.04855
42	Dehloran	Mormori	6279	08/18/2014	39	6	0.0412	0.0466	0.0439

Table 4. Kappa values (k) for horizontal components L and T and their mean for zone No. 16
表 4.16 区域 kappa 值的水平分量 L、T 及其平均值

NO.	Sation	Earthquake name	Record	Date mm/dd/yyyy	Epicenter dis	Mw	Kappa (L)	Kappa (T)	Kappa (mean)
1	Ahvaz1	Dehloran	4635	8/27/2008	160	5.8	0.0502	0.0458	0.048
2	Alhaee	Dehloran	4639	8/27/2008	133	5.8	0.0535	0.0566	0.05505
3	Abdolkhan	Dehloran	4633	8/27/2008	99	5.8	0.048	0.0501	0.04905
4	Bostan	Dehloran	4636	8/27/2008	83	5.8	0.0364	0.0364	0.0364
5	Shoosh	Dehloran	4643	8/27/2008	78	5.8	0.0401	0.0497	0.0449

4. 伊朗西部地震带 Kappa 值分析产出

在本节中，利用式(12)计算出 15、16 和 25 地震带的 kappa 值，在这项研究中，我们使用西部地区，因为伊朗有很多地震，包括 2017 年 12 月 11 日在 Ezgele 地震(克尔曼沙省)。图 8、图 9、图 10 分别绘制 15、16、25 地震带不同距离上 k 值的产出(水平分量 L、T 及其平均值计算)。此外，在图 8、图 9、图 10 中，通过 k 值和 R 值的线性拟合曲线，得出 k 与 R 值在每个地震区域的关系。

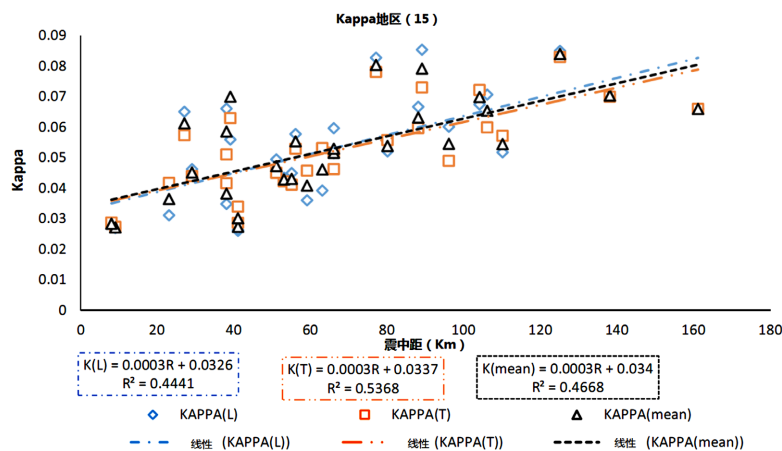


Figure 8. Diagram of horizontal components and their mean for zone No. 15
图 8.15 区域水平分量及其均值分布图

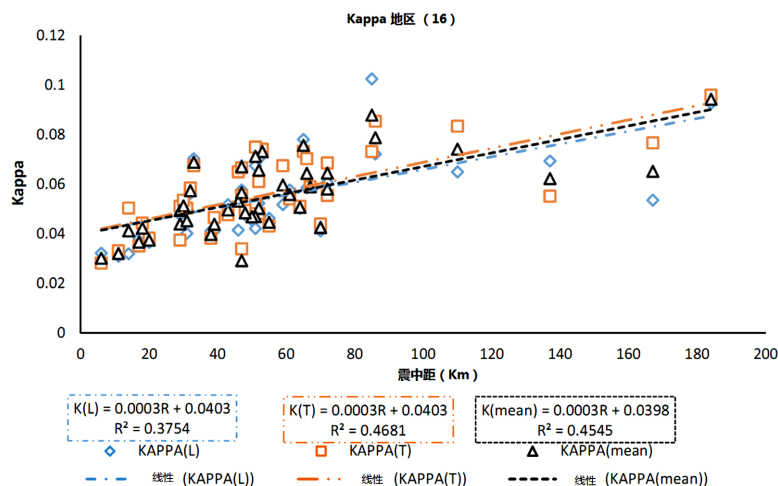


Figure 9. Diagram of horizontal components and their mean for zone No. 16
图 9.16 区域水平分量及其均值分布图

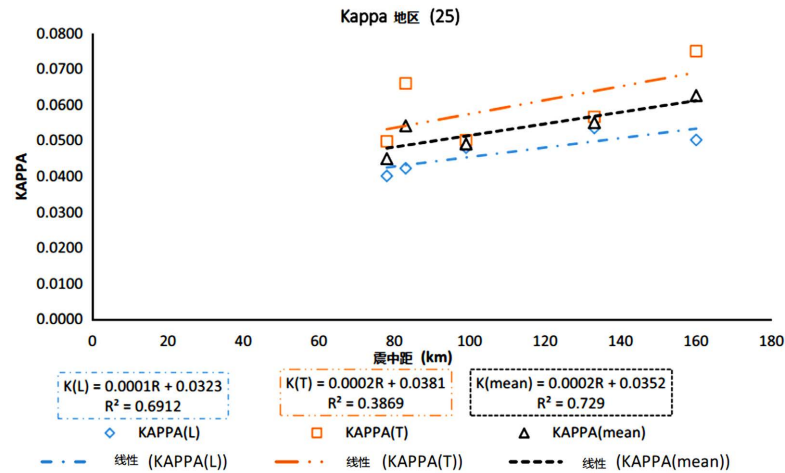


Figure 10. Diagram of horizontal components and their mean for zone No. 25
图 10. 25 区域水平分量及其均值分布图

在图 11 中, 绘制了两个水平加速度分量的 k 值及其平均值, 与伊朗西部所有记录的 R 值(第 15、16 和 25 区域地震带的积累)。

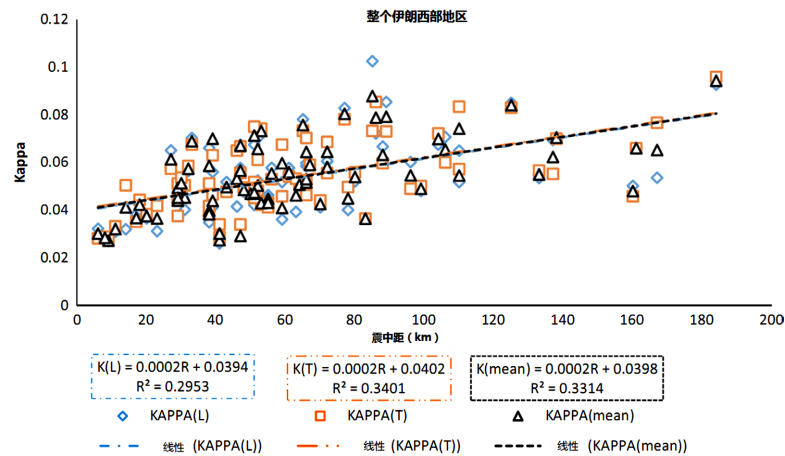


Figure 11. Diagram of horizontal components and their mean for the west of Iran
图 11. 伊朗西部区域水平分量及其均值分布图

计算结果可根据公式进行总结。(13)~(16)三个地震带和他们聚集。

区域 15:

$$K(Z15) = 0.0003R + 0.0331 \quad (14)$$

区域 16:

$$K(Z16) = 0.0003R + 0.0398 \quad (15)$$

区域 25:

$$K(Z25) = 0.0002R + 0.035 \quad (16)$$

伊朗西部:

$$K(\text{All}) = 0.0002R + 0.0398 \quad (17)$$

5. 讨论和结论

本文利用伊朗西部的加速度记录和伊朗最新的地震构造分区图, 计算了伊朗西部的 k 参数, 因此每个地震带发生的地震和他们在同一地震带的相应记录一起被使用。共使用 10 次地震 76 个加速度记录, 包括 2017 年 11 月 12 日克尔曼沙(Ezgeleh)发生的 7.3 级地震。

分别给出各水平分量的傅里叶加速度谱, 频率以横轴表示(十进制刻度), 加速度傅里叶振幅谱以纵轴表示(对数刻度), 因此频率 F_E 与 F_x 之间出现曲线的梯度就是 $kappa$ 值参数, 平均 k 值是计算两水平分量的平均, k 和震中距离(R)之间的关系取决于线性拟合在每个地震带区域, 并且给出了等式方程。对整个伊朗西部也提出了一个方程, 进行方程计算和比较阐明, 在伊朗西部多样地震带 k_0 值由 0.0331 到 0.0398。该参数可以有效地用综合方法计算该区的强地震动, 避免了其他方程的近似和误差, 将结果与其他研究给出不同的方程结果进行对比, 如图 12 所示。

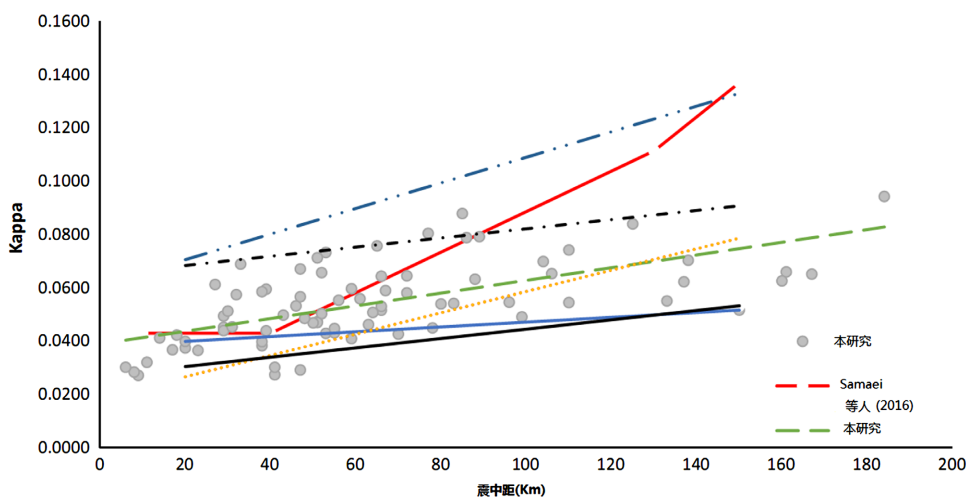


Figure 12. Correlation of k , with Epicenter dis (km): comparison of the results of this study with existing empirical correlations
图 12. k 与震中距的关系: 本研究结果与已有的经验相关性比较

对伊朗西部地区的 $kappa$ 分析结果表明, $kappa$ 参数随着震中距的增大而增大。15 区和 16 区 $kappa$ 随距离增加的速率相同, 说明两个区具有相似的地质构造性质。另一方面, 在这三个区域 k_0 在 0.03 与 0.04 之间, 这与 Drouet 等人对伊朗西部部分地区(Zagros)岩石性质的研究结果有很好的的一致性[8] [13], 其他人研究结果如图 12 所示, 从图中可以看出, 在 15~90 km 的距离范围内, 两水平分量和平均值的 $kappa$ 都以恒定的梯度增加, 而 90 km 之后的曲线梯度下降(和 $kappa$ 减小), [14]这被 Castro 等人注意到, 他们确定了 70~100 公里距离的减少趋势[10]。考虑到本次研究的震级为 5~7.3 级, 我们发现震级对 $kappa$ 参数没有显著影响。

基金项目

内蒙古自治区地震局局长基金(2021JC03); 中国地震局地震科技星火计划(XH20014)。

参考文献

- [1] Anderson, J.G. and 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**, 1969-1993.
- [2] Ktenidou, O.J., Gélis, C. and Bonilla, L.F. (2013) A Study on the Variability of Kappa (κ) in a Borehole: Implications of the Computation Process. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**, 1048-1068.

- <https://doi.org/10.1785/0120120093>
- [3] 李文倩. 用数字地震台网小震数据建立兰州和华北地区强地震动衰减关系[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014.
- [4] 包金哲, 王树波, 张帆. 鄂尔多斯西缘地区地震动高频衰减特性初步研究[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(2): 293-301.
- [5] Gerami, M. and Mehdizadeh, K. (2007) Fourier Series Applications in Civil Engineering. *2nd National Conference on Rehabilitation and Reinforcement of Iran*, Kerman.
- [6] Hanks, T.C. (1979) b Values and $\omega^{-\gamma}$ Seismic Source Models: Implications for Tectonic Stress Variations along Active Crustal Fault Zones and the Estimation of High-Frequency Strong Ground Motion. *Journal of Geophysical Research*, **84**, 2235-2242. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02235>
- [7] Hanks, T.C. (1982) f_{max} . *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, 1867-1879. <https://doi.org/10.1785/BSSA07206A1867>
- [8] Drouet, S., Theodulidis, N. and Savva, A. (2008) Site Effects from Parameterised Generalised Inversions. *ESC 31st General Assembly*, Hersonissos, 8-12 September 2008.
- [9] Cormier, V.F. (1982) The Effect of Attenuation on Seismic Body Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, S169-S200.
- [10] Castro, R.R., Trojani, L., Monachesi, G., Mucciarelli, M. and Cattaneo, M. (2000) The Spectral Decay Parameter κ in the Region of Umbria-Marche, Italy. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 23811-23823. <https://doi.org/10.1029/2000JB900236>
- [11] Douglas, J., Gehl, P., Bonilla, L.F., Scotti, O., Régnier, J., Duval, A.-M. and Bertrand, E. (2009) Making the Most of Available Site Information for Empirical Ground-Motion Prediction. *Bulletin Seismological Society of America*, **99**, 1502-1520.
- [12] Karimiparidari, S., Zare, M. and Memarian, H. (2011) New Seismotectonic Zoning Map of Iran. *Proceeding of the 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE6)*, CD-ROM.
- [13] Seismosoft (2016) SeismoSignal—A Computer Program for Signal Processing of Time-Histories. <http://www.seismosoft.com>
- [14] Samaei, M., Miyajima, M., Yazdani, A. and Jaafari, F. (2016) High Frequency Decay Parameter (κ) for Ahar-Varzaghan Double Earthquakes, Iran (M_w 6.5 & 6.3). *Journal of Earthquake and Tsunami*, **10**, Article ID: 1640006. <https://doi.org/10.1142/S1793431116400066>