

鄂尔多斯西缘地区地震动高频衰减特性初步研究¹

包金哲 王树波 张帆

(内蒙古自治区地震局, 呼和浩特 010010)

摘要 以鄂尔多斯西缘地区(34°N—42°N, 103°E—109°E)为研究对象, 基于 2007—2020 年研究区域内 14 个强震动台站记录到的 116 条强震记录($1 \leq M_s \leq 8$), 采用加速度反应谱法, 通过 MATLAB 软件编程拟合鄂尔多斯西缘地区 κ 值与震中距的线性回归关系。研究表明, 鄂尔多斯西缘地区强震台站高频衰减参数 κ_0 值为 0.01545~0.06560 s; 等效剪切波速(V_{s20} 、 V_{s30})与震中距存在对数关系; 随着 V_{s20} 、 V_{s30} 的增大, κ_0 值逐渐减至 0。

关键词: 鄂尔多斯西缘地区 地震动 高频衰减 κ 震中距

A Preliminary Study on the Attenuation Characteristics of High Frequency Ground Motion in the Western Margin of Ordos

Bao Jinzhe, Wang Shubo and Zhang Fan

(Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract The western margin of Ordos (N: 34°—42°; E: 103°—109°) as the research object, using 2007 to 2020, the research area of 14 strong motion stations recorded of the 116 strong earthquake events data ($2 \leq M_s \leq 8$), using Anderson and Hough the classic algorithm, using MATLAB software programming to calculate the ordos west region, the linear relationship between the κ value and the epicenter distance to calculate the ordos κ_0 earthquake stations in the western margin high frequency attenuation parameter value is between 0.01545 s to 0.06560 s. There is a logarithmic relationship between equivalent shear wave velocities (V_{s20} , V_{s30}) and epicenter distance. With the increase of V_{s20} and V_{s30} , the κ_0 value gradually decreases to 0.

Key words: Western margin of Erdos region; Ground motion; High Frequency attenuation; κ ; Epicentral distance

引言

地震动高频衰减在工程地震领域有着重要的应用, 常被用于震源、地震动模拟和衰减关系研究等工作中。 κ 值是描述地震动高频衰减参数之一, 多位学者对其进行了研究, 如 Sun 等 (2013) 选用汶川地震 52 个主震加速度数据, 得到 κ 值变化范围, 认为 κ 值与震源和传播路径有关。Anderson 等 (1984, 1986, 1991) 发现在美国加州地区强震数据中, κ 值与震中距表现出正相关关系。李文倩 (2014) 基于华北地区近 2000 条数据, 利用 Anderson 等 (1984) 的方法得到 κ 值, 认为 κ 值与震级和震源深度无关, 但离散性较大; 朱百慧 (2016) 采用 Anderson 等 (1984) 经典计算方法、固定应力降计算方法及宽带反演计算方法, 以日本东北地区为研究区域, 利用 K-NET 和 KiK-net 强震记录, 对 κ 值与传播途径、震级及局部场地特征的关系进行分析, 发现 κ 值与震中距具有一定线性关系, 随着震中距的增大 κ 值呈增

1 基金项目 中国地震局监测、预报、科研三结合课题 (3JH202001015); 中国地震局地震科技星火计划 (XH20014)
【收稿日期】 2020-12-08
【作者简介】 包金哲, 男, 生于 1986 年。工程师。主要从事强震动观测方面的研究。E-mail: 240880500@qq.com
【通信作者】 王树波, 男, 生于 1980 年。高级工程师。主要从事强震动观测工作。E-mail: 21560681@qq.com

长趋势, κ 值与震级的线性关系不明显, 随着 V_{S30} 的增大 κ 值呈对数下降趋势。

鄂尔多斯块体是古克拉通块体, 其内部结构稳定, 但其外部地震频发, 尤其是鄂尔多斯块体西缘地区, 该区域属于亚洲东部“大三角”地震构造区东边缘(高祥林等, 2010), “大三角”地震构造沿华南、鄂尔多斯西缘向北延伸至贝加尔湖附近, 曾被称为中蒙大陆中轴构造带, 研究该区域具有深远意义。鄂尔多斯西缘地区由内蒙古强震动台网、宁夏强震动台网属地监控, 该区域共有 14 个强震动台站, 台站积累了真实可靠的地震数据, 为研究提供了数据支撑。

本文以鄂尔多斯西缘地区(34°N—42°N, 103°E—109°E) 14 个固定强震台站(包括 8 个内蒙古强震台站和 6 个宁夏强震台站) 2007—2020 年 116 条强震记录($1 \leq M_s \leq 8$) 为研究对象, 利用 Anderson 等(1984)提出的经典算法, 通过 MATLAB 软件计算 κ_0 值, 讨论 κ 值与震中距、 κ_0 值与 V_{S20} 、 V_{S30} 的关系。

1 研究区域台站分布与地质构造特征

鄂尔多斯西缘地区地质条件复杂, 北部临河断陷盆地西南方向与潮水—吉兰泰断陷盆地相连。南部有银川地堑、干盐池盆地, 东部鄂尔多斯盆地是古老的克拉通地块, 地块相对稳定。西北部地区为阿拉善块体, 近年中小震频发。区域内有河套平原和宁夏平原, 均为第四纪泥沙沉积覆盖的冲击平原。

临河断陷盆地自早第三纪晚期开始发育, 新生界沉积厚度最大达 10 000 m 以上, 第四纪以来断陷活动依然保持了第三纪晚期的活动特征, 周边山地继续抬升, 断陷继承性沉降, 第四纪厚度 2 400 m。吉兰泰盆地最初发育于早白垩纪, 但晚白垩纪-早第三纪古新世时期抬升为陆地, 始新世又重新开始发育, 直到现在。该断陷盆地内新生界厚度约 2 000 m, 其中第四纪最大厚度约 400 m, 沉降中心靠近巴彦乌拉山东麓断裂。银川地堑是由喜马拉雅造山运动时期构造活跃的贺兰山褶皱带与鄂尔多斯盆地相对上升形成的, 其为本区域最大的拉张型活动盆地, 北起石嘴山, 南至青铜峡, 长 160 km, 最宽 55 km, 地堑形成于渐新世, 其后持续下陷, 沉积了巨厚的新生代地层, 总厚度达 7 000 m, 其中古近纪最大厚度 3 600 m, 新近系最大厚度 2 500 m, 第四纪最大厚度 >1 609 m。干盐池盆地为青藏高原东北边界海原断裂带内最大的拉分盆地, 沉积物粒度呈向上逐渐变细的趋势, 湖泊沉积为主, 干盐池盆地主要受南—西华山与唐家坡—干盐池断层的控制, 最深处可能 >550 m。第四纪以来, 构造运动主要以大面积的周期节奏性震荡上升为主, 在西吉县形成了剥蚀构造山地、构造剥蚀红岩丘陵, 剥蚀堆积黄土丘陵, 侵蚀堆积河谷平原。西吉县大面积被第四纪覆盖。河套平原是冲击平原, 河套地区北部、南部断层证明该区域存在断层下陷, 黄河流经低洼地区带来泥沙淤积, 形成河套平原。宁夏平原也是冲击平原, 由于贺兰山与鄂尔多斯高原的抬升, 宁夏平原断裂下陷形成地堑带, 后由于黄河携带大量泥沙堆积形成宁夏平原, 可知宁夏平原是由地壳运动、断裂下陷、河流流水搬运堆积而成。

2 计算分析

2.1 数据选取

研究数据来自于内蒙古自治区地震局和宁夏自治区地震局提供的地震记录数据、钻孔资料、剪切波速测试资料、地质条件资料等, 研究区域地震台站信息如表 1 所示, 台站分布及地质构造如图 1 所示。

2.2 计算方法

加速度反应谱法由 Anderson 等(1984)提出, 是目前工程地震学领域中使用最广泛的方法, 本文采用该方法计算 κ 值, 开展区域高频衰减特性研究。频率高于特定频率 f_E 的单对数坐标系加速度傅立叶谱幅值衰减规律可表示为:

$$A(f) = A_0 \cdot \exp(-\pi k f), f > f_E \quad (1)$$

式中, A_0 为依赖于震源特征和传播距离的因子, k 为谱衰减参数, f 为地震动频率, f_E 为谱幅值对数值近似直线下降的起始点。

一般来说, 当频率达 f_E 后, 谱幅值随着频率的增加呈指数下降。在线性-对数坐标系(即单对数坐标系)下, 高频衰减参数 k 可用最简单的线性关系式近似得到:

$$k = -\lambda/\pi \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\ln(A_2(f)) - \ln(A_1(f))}{f_2 - f_1} = \frac{\ln(\Delta a)}{\Delta f} \quad (3)$$

表 1 研究区域地震台站信息

Table 1 The research area seismic station information

序号	台站名称	经度	纬度	记录器型号	场地类型
1	巴彦浩特	105.7°E	38.8°N	ETNA	土层
2	巴彦木仁	106.7°E	39.9°N	ETNA	土层
3	宝丰	106.3°E	39.0°N	MR-2002	土层
4	磴口	106.9°E	40.3°N	ETNA	土层
5	干盐池	105.3°E	36.6°N	MR-2002	土层
6	公地	106.8°E	40.6°N	ETNA	土层
7	吉兰泰	105.7°E	39.7°N	ETNA	土层
8	临河	107.6°E	40.8°N	ETNA	土层
9	灵武	106.3°E	38.1°N	MR-2002	土层
10	前进农场	106.4°E	38.8°N	MR-2002	土层
11	青铜峡	106.0°E	38.0°N	MR-2002	基岩
12	沙海	106.9°E	40.9°N	ETNA	土层
13	乌海	106.8°E <td 39.4°N	ETNA	土层	
14	西吉	105.4°E	35.5°N	MR-2002	土层

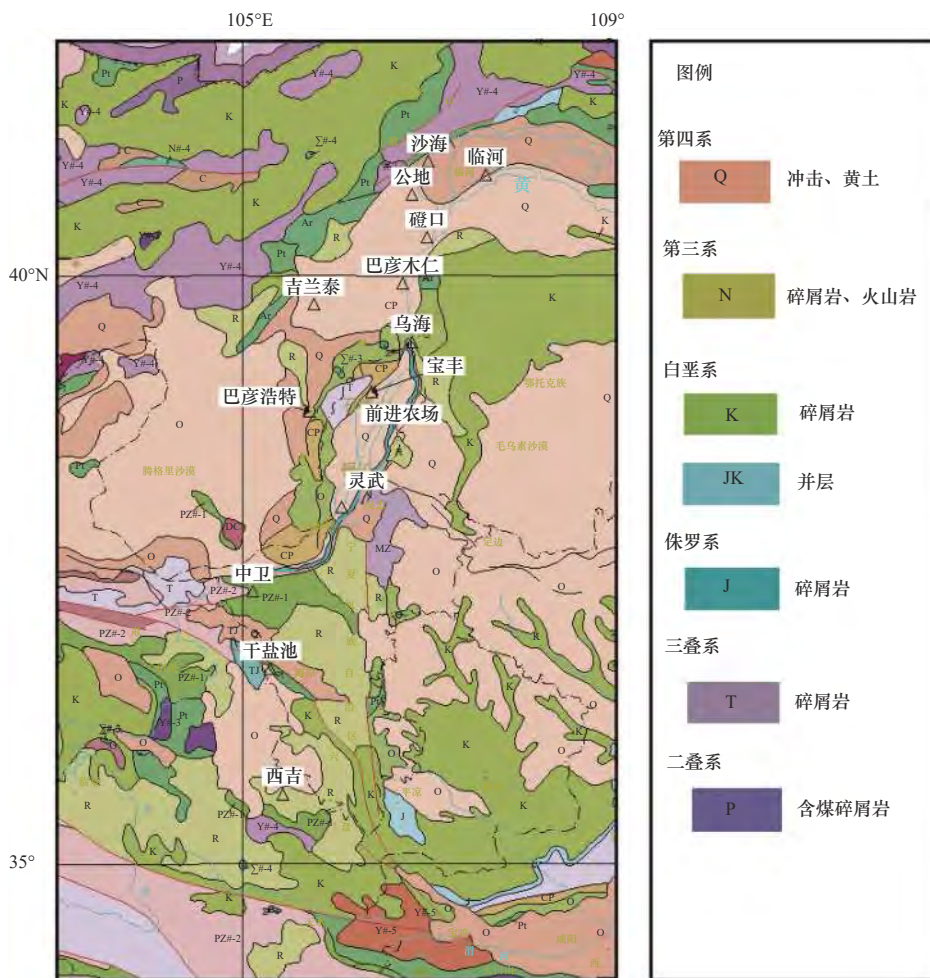


图 1 台站分布及地质构造

Fig. 1 The distribution of seismograph station and geologic structure

κ 值计算截止点为傅立叶谱与噪声谱重合的点或幅值平行起始点, 利用最小二乘法进行线性拟合, 得到的斜率即为 κ 值 (图 2)。

为计算和确定 κ 值与震中距 R 的关系, 利用最小二乘法得到线性回归方程:

$$K = K_0 + K_R \cdot R(s) \quad (4)$$

$$\bar{K}_0 = [\kappa_0(N-S) + \kappa_0(E-W)]/2 \quad (5)$$

式中, $R(s)$ 为震中距, K_0 和 K_R 为常数量, K_0 为由台站附近近地表地下地质构造引起的高频衰减参数值, K_R 为与区域相关的衰减参数值 (Anderson 等, 1984)。
 $\kappa_0(N-S)$ 和 $\kappa_0(E-W)$ 分别为 κ 南北向和东西向分量, \bar{K}_0 表示强震台南北向、东西向 κ_0 均值。

2.3 数据处理

利用 MATLAB 语言编辑计算处理全部程序, 包括 κ 值、 κ 值与震中距关系、 κ_0 值、 κ_0 值与 V_{S20} 、 V_{S30} 关系计算程序。

(1) 通过编程实现对强震观测记录数据的处理, 包括基线调整、采用 0.1~20 Hz 的带通滤波 (白立新等, 2019)、数据初筛及人工复筛等工作 (崔建文等, 2007; 万永革, 2012)。

(2) 分析单个台站多次地震事件, 利用计算机程序获得每次地震每个分量的 κ 值, 进而利用每个分量的 κ 值结合震中距, 采用最小二乘法进行拟合, 得到 κ 值与震中距的线性回归方程 (陶正如等, 2015)。

(3) 分别求出 116 条强震记录 $\kappa_0(N-S)$ 与 $\kappa_0(E-W)$ 值与震中距的回归方程, 并计算拟合优度 R^2 。计算 $\kappa_0(N-S)$ 、 $\kappa_0(E-W)$ 、 \bar{K}_0 值, 对 \bar{K}_0 值与 V_{S20} 、 V_{S30} 进行拟合, 得到拟合关系曲线。

2.3.1 κ 值与震中距的关系

κ 值与震中距的关系计算结果如表 2、图 3 所示, 由表 2、图 3 可知, κ 值与震中距存在线性回归关系; κ 值在鄂尔多斯西缘大部分地区拟合优度值相对较高, 为 0.6~0.9, 而西吉台站地区南北向、东西向拟合优度值分别为 0.47、0.49, 可能是由于台站记录地震数据较少、仪器噪声过高等原因导致 κ 值相对离散, 拟合优度较低。

2.3.2 计算结果不确定性分析

通过大量计算得到研究区域 116 条地震记录地震动峰值加速度 PGA 及震中距, 震级与震中距关系分布如图 4 所示, 震级与峰值加速度 PGA 关系分布如图 5 所示。由图 4、5 可知, 震级为 $M_{\geq}2.0 \sim M_{\leq}8.0$, 震中距为 0~1200 km, 峰值加速度 PGA 为 0~180 cm/s^2 , 多数集中在 0~60 cm/s^2 。

由于研究区域地震较少, 覆盖层较厚, 台站有效记录地震数据不足, 且 κ 值与震中距拟合关系受远震 (汶川地震等) 影响, 故拟合结果存在一定不确定性。针对此问题, 剔除了震中距 500 km 以上的地震。部分台站拟合结果偏差较大, 以巴彦木仁、磴口台站为例进行分析, 结果如表 3、图 6 所示。由表 3、图 6 可知, 剔除汶川地震等远震后, 拟合优度值明显下降, 巴彦木仁台南北向拟合优度值由 0.86911 降至 0.6186, 东西向拟合优度值由 0.9280 降至 0.7081; 磴口台南北向拟合优度值由 0.8971 降至 0.2447, 东西向拟合优度值由 0.9425 降至 0.6064。综上所述, κ 值与震中距线性拟合受远震的影响较大, 因此计算 κ 值时应尽量考虑震中距为 500 km 以内的地震数据。

2.3.3 κ_0 值与剪切波速关系

研究区域有 14 个强震动台站, 内蒙古强震动台网 8 个台站分别为: 巴彦木仁台、巴彦浩特台、磴口台、公地台、吉兰泰台、临河台、沙海台、乌海台, 宁夏强震动台网 6 个台站分别为: 宝丰台、干盐池台、灵武台、前进农场台、青铜峡台、西吉台。计算得到研究区域内 14 个台站的 κ_0 值, 结合台站提供的钻孔资料, 得到剪切波速 V_{S20} 、 V_{S30} 值, 进而得出台站 κ_0 值与剪切波速 V_{S20} 拟合关系式为:

$$\kappa_0 = -0.03589 \times \ln V_{S20} + 0.2458, R^2 = 0.3929 \quad (6)$$

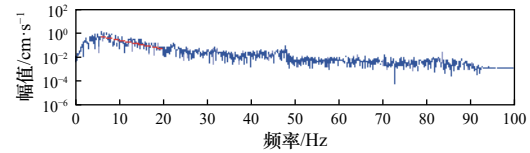
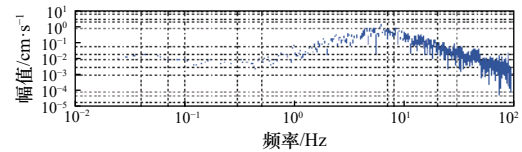


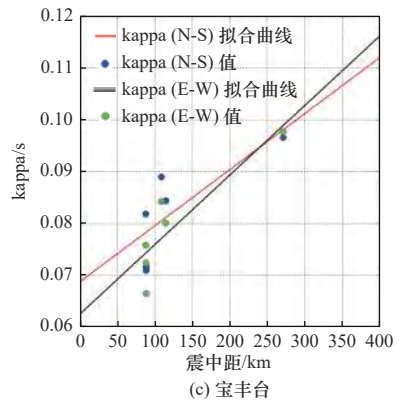
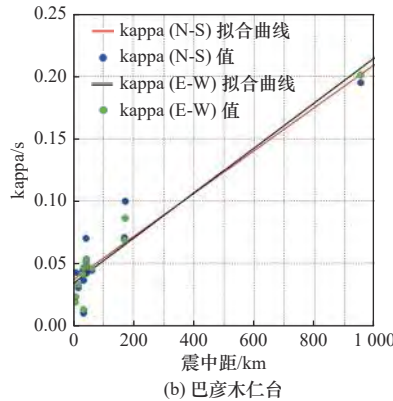
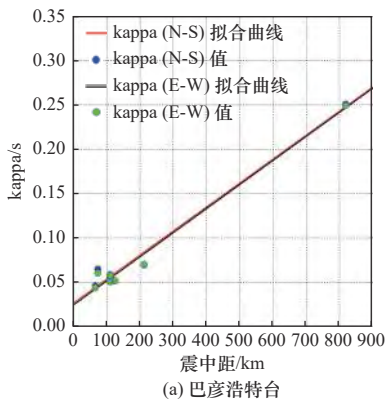
图 2 Anderson 等 (1984) 经典计算方法计算的 κ 值

Fig. 2 Anderson&Hough's the classical method calculates κ

表 2 kappa 值与震中距拟合结果

Table 2 The relationship between kappa and epicentral distance

台站名称	方向	回归方程	K_0/s	拟合优度值/ R^2	\bar{K}_0/s	$V_{S20}/m \cdot s^{-1}$	$V_{S30}/m \cdot s^{-1}$
巴彦浩特	N-S	$\kappa=0.000\ 3R+0.026\ 4$	0.0264	0.9803	0.025 30	343.05	370.2
	E-W	$\kappa=0.000\ 3R+0.024\ 2$	0.0242	0.9854			
巴彦木仁	N-S	$\kappa=0.000\ 2R+0.036\ 3$	0.0363	0.8691	0.03485	353.4	389.4
	E-W	$\kappa=0.000\ 2R+0.033\ 4$	0.0334	0.9280			
宝丰	N-S	$\kappa=0.000\ 1R+0.068\ 7$	0.0687	0.6055	0.065 60	180.4	222.1
	E-W	$\kappa=0.000\ 1R+0.062\ 5$	0.0625	0.7876			
磴口	N-S	$\kappa=0.000\ 1R+0.060\ 5$	0.0605	0.8971	0.05845	231.7	261.7
	E-W	$\kappa=0.000\ 1R+0.056\ 4$	0.0564	0.9425			
干盐池	N-S	$\kappa=0.000\ 1R+0.053\ 1$	0.0531	0.7542	0.05245	317.4	357.3
	E-W	$\kappa=0.000\ 1R+0.051\ 8$	0.0518	0.7194			
公地	N-S	$\kappa=0.000\ 2R+0.054\ 1$	0.0541	0.9790	0.05450	222.7	251.2
	E-W	$\kappa=0.000\ 2R+0.054\ 9$	0.0549	0.9730			
吉兰泰	N-S	$\kappa=0.000\ 2R+0.052\ 6$	0.0526	0.8812	0.05525	327.7	335.8
	E-W	$\kappa=0.000\ 2R+0.057\ 9$	0.0579	0.7826			
临河	N-S	$\kappa=0.000\ 1R+0.053\ 0$	0.0530	0.9977	0.05175	232.3	249.7
	E-W	$\kappa=0.000\ 1R+0.050\ 5$	0.0505	0.9960			
灵武	N-S	$\kappa=0.000\ 3R+0.044\ 9$	0.0449	0.9996	0.04415	292.6	325.1
	E-W	$\kappa=0.000\ 3R+0.043\ 4$	0.0434	0.9957			
前进农场	N-S	$\kappa=0.000\ 3R+0.063\ 7$	0.0637	0.7536	0.06555	209.5	248.9
	E-W	$\kappa=0.000\ 3R+0.067\ 4$	0.0674	0.6815			
青铜峡	N-S	$\kappa=0.000\ 1R+0.042\ 8$	0.0428	0.4987	0.04315	219.0	260.0
	E-W	$\kappa=0.000\ 1R+0.043\ 5$	0.0435	0.6287			
沙海	N-S	$\kappa=0.000\ 2R+0.048\ 9$	0.0489	0.9743	0.04870	188.3	216.5
	E-W	$\kappa=0.000\ 2R+0.048\ 5$	0.0485	0.9710			
乌海	N-S	$\kappa=0.000\ 5R+0.015\ 5$	0.0155	0.7320	0.01545	352.7	390.5
	E-W	$\kappa=0.000\ 5R+0.015\ 4$	0.0154	0.6702			
西吉	N-S	$\kappa=0.000\ 1R+0.042\ 9$	0.0429	0.4713	0.04240	195.1	228.7
	E-W	$\kappa=0.000\ 1R+0.041\ 9$	0.0419	0.4909			



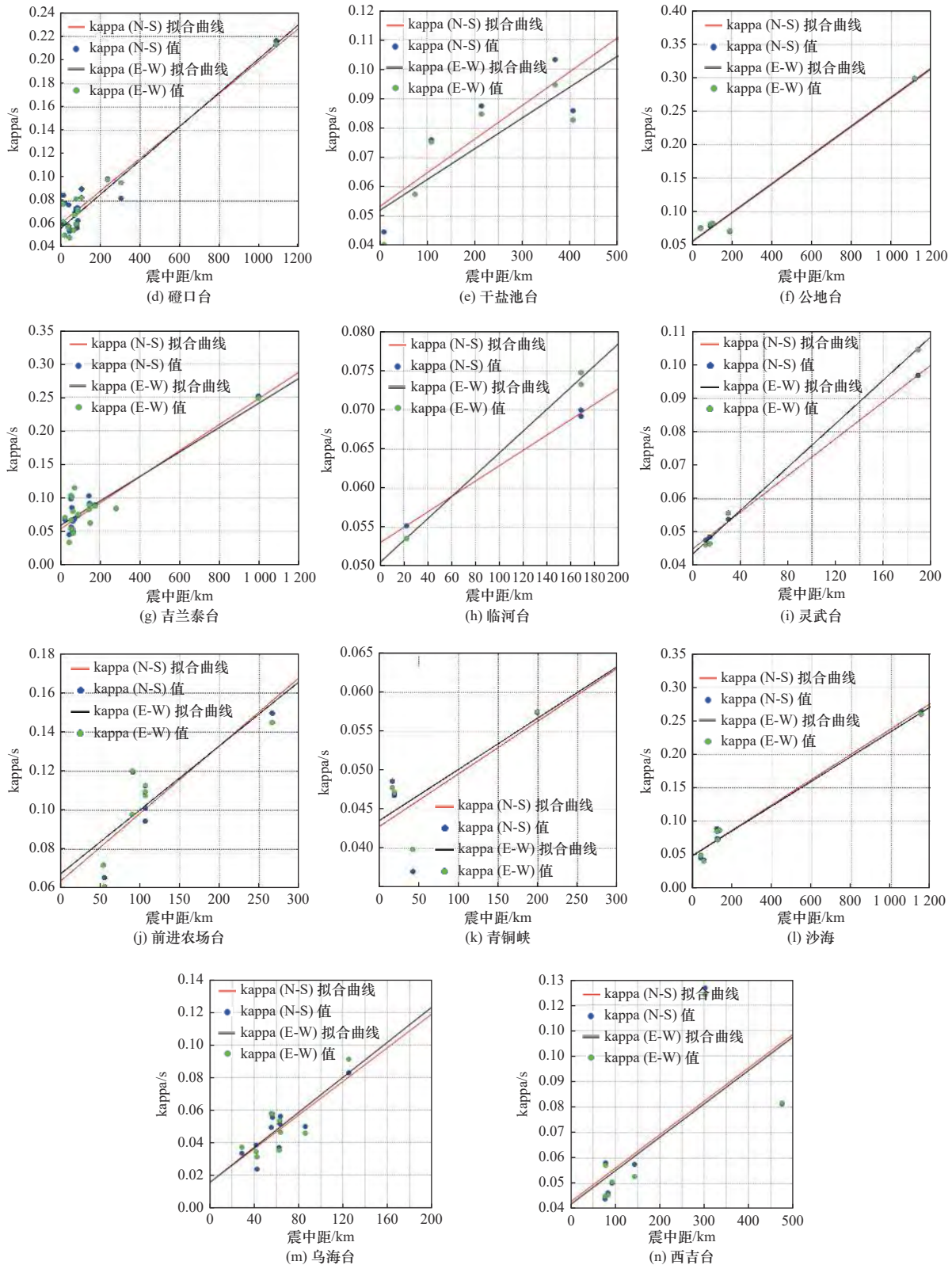


图 3 鄂尔多斯西缘地区 14 个台站 kappa 值与震中距拟合关系

Fig. 3 The fitting relationship between kappa and epicentral distance of 14 stations in the western margin of Erdos region

kappa₀ 值与剪切波速 V_{S30} 拟合关系式为:

$$\text{kappa}_0 = -0.04238 \times \ln V_{S30} + 0.2868, R^2 = 0.4144 \quad (7)$$

kappa₀ 值与剪切波速 V_{S20} 、 V_{S30} 拟合关系曲线如图 7 所示。由式 (6)、式 (7)、图 7 可知, kappa₀ 值与剪切波速 V_{S20} 、 V_{S30} 存在对数关系, 拟合优度值约为 0.4, 拟合效果不理想, 结合朱百慧 (2016) 的研究成

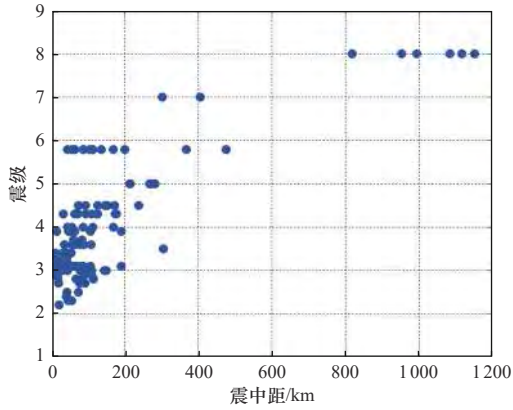


图 4 震级与震中距关系分布图

Fig. 4 Distribution of earthquake magnitude and epicenter distance

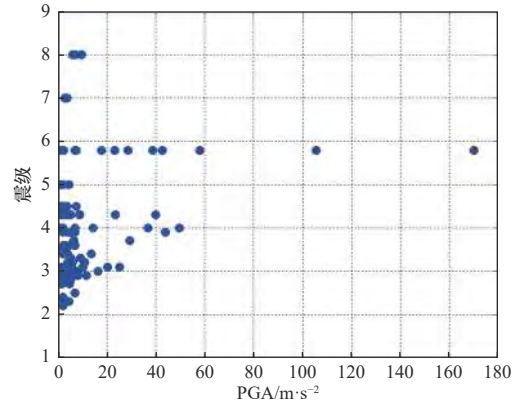


图 5 震级与峰值加速度 PGA 关系分布图

Fig. 5 Distribution of earthquake magnitude and PGA(peak acceleration value)

表 3 巴彦木仁、磴口台站 kappa 值与震中距拟合结果

Table 3 Fitting results of kappa value and epicenter distance at Bayanmuren and Dengkou station

台站名称	方向	回归方程	K_0/s	拟合优度值/ R^2
巴彦木仁	N-S	$kappa=0.000\ 3R+0.027\ 5$	0.0275	0.6186
	E-W	$kappa=0.000\ 3R+0.026\ 6$	0.0266	0.7081
磴口	NS	$kappa=0.000\ 1R+0.065\ 0$	0.0650	0.2447
	EW	$kappa=0.000\ 1R+0.056\ 2$	0.0562	0.6064

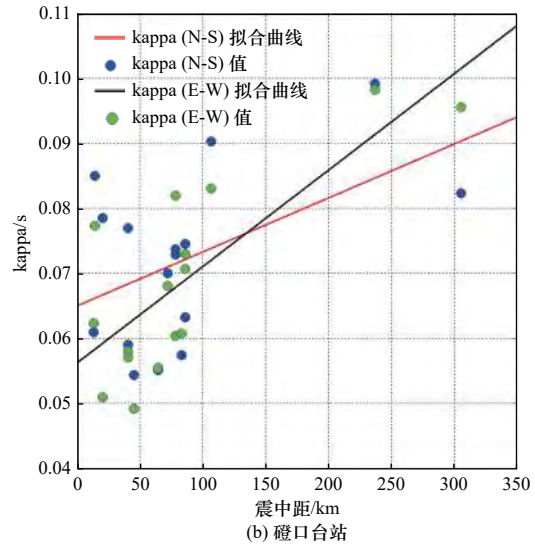
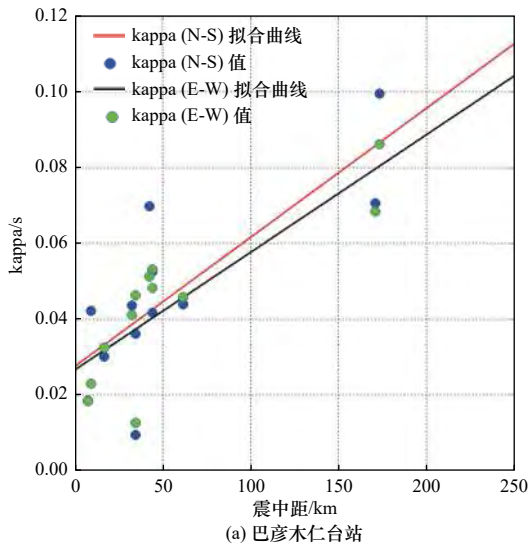


图 6 巴彦木仁、磴口台站 kappa 值与震中距拟合关系

Fig. 6 Fitting relationship between kappa and epicenter distance at Banyanmuren and Dengkou station

果，笔者认为 kappa0 值随着 V_{S20} 、 V_{S30} 的增大逐渐减至 0 (Ktenidou 等, 2013)。

3 结论

本文利用 Anderson 等 (1984) 提出的经典方法，通过计算得出以下结论：

- (1) 鄂尔多斯块体西缘地区强震台站 kappa 值与震中距呈线性相关，且拟合优度值较高；
- (2) kappa0 值为 0.01545~0.06560 s；
- (3) kappa0 值与 V_{S20} 、 V_{S30} 呈指数相关关系，离散性较大，拟合优度值约为 0.4；
- (4) 随着 V_{S20} 、 V_{S30} 的增大，kappa0 值逐渐减至 0。

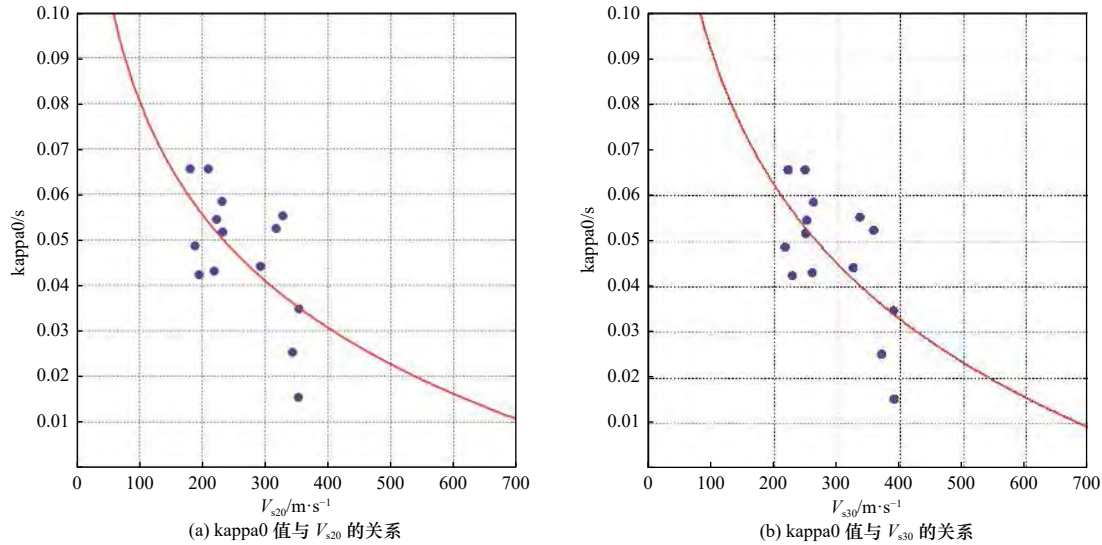


图 7 kappa0 值与剪切波速 V_{s20} 、 V_{s30} 拟合关系曲线

Fig. 7 The fitting relationship between kappa0 and shear-wave (V_{s20} 、 V_{s30}) velocity

(5) 本研究采用的地震数据较少, 分析得到的 kappa 值与震中距线性拟合受远震的影响较大, 因此计算 kappa 值时应尽量考虑震中距 500 km 以内的地震数据。

致谢 本文在撰写过程中得到中国地震局工程力学研究所研究员陶正如、新疆地震局工程师李文倩、广东地震局高级工程师吴华灯、云南地震局研究员崔建文、防灾学院教授万永革、宁夏地震局高级工程师吕俊强及工程师李鸿廷的悉心帮助, 在此向他们表示衷心感谢, 同时感谢评审专家提出的宝贵意见。

参考文献

- 白立新, 成云辉, 张杰等, 2019. 河北永清 M4.3 地震北京烈度仪台网记录分析. *震灾防御技术*, **14**(1): 210—219.
- Bai L. X., Cheng Y. H., Zhang J., et al., 2019. Analysis of the record of Beijing seismic intensity meter network for the M4.3 Yongqing earthquake. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **14**(1): 210—219. (in Chinese)
- 崔建文, 李正光, 赵云旭, 2007. 2007 年宁洱 6.4 级地震强震动观测记录. *地震研究*, **30**(4): 384—388.
- Cui J. W., Li Z. G., Zhao Y. X., 2007. Strong motion observation records of the 2007 Ning'er, Yunnan, M_s 6.4 earthquake. *Journal of Seismological Research*, **30**(4): 384—388. (in Chinese)
- 高祥林, 马晓静, 李晓丽, 2010. 亚洲东部“大三角”地震构造区的周边和深部动力环境. *地学前缘*, **17**(4): 33—42.
- Gao X. L., Ma X. J., Li X. L., 2010. A surrounding and deep dynamic context of the great triangle-shaped seismic region in the eastern Asia continent. *Earth Science Frontiers*, **17**(4): 33—42. (in Chinese)
- 李文倩, 2014. 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. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- Li W. Q., 2014. Strong ground motion attenuation relationships for Lanzhou and North China from small earthquake records by China earthquake networks. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 陶正如, 陶夏新, 2015. 美国 2014 地震区划中采用的地震动衰减关系. *世界地震工程*, **31**(3): 78—84.
- Tao Z. R., Tao X. X., 2015. Ground motion attenuation relationships adopted in 2014 update of the US national seismic hazard maps. *World Earthquake Engineering*, **31**(3): 78—84. (in Chinese)
- 万永革, 2012. 数字信号处理的 MATLAB 实现. 2 版. 北京: 科学出版社.
- 朱百慧, 2016. 强震数据 Kappa 值影响因素的讨论. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- Zhu B. H., 2016. The influence factors of Kappa from strong motion records. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 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.
- Anderson J. G., 1986. Implication of attenuation for studies of the earthquake source. *American: Earthquake Source Mechanics*.

American Geophysical Union, **37**: 311—318.

Anderson, J. G., Humphrey J. R. Jr., 1991. A least squares method for objective determination of earthquake source parameters. *Seismological Research Letters*, **62**(3—4): 201—209.

Ktenidou O. J., Gélis C., 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**(2A): 1048—1068.

Sun X. D., Tao X. X., Duan S. S., et al., 2013. Kappa (k) derived from accelerograms recorded in the 2008 Wenchuanmainshock, Sichuan, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, **73**: 306—316.