

利用 Aki 模型对宁夏及邻区尾波 Q 值的研究

师海阔¹, 朱新运^{2,3}, 贺永忠¹, 张立恒¹

(1. 宁夏地震局中卫地震台, 宁夏 中卫 755000; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;
3. 浙江省地震局, 浙江 杭州 310013)

摘要:利用单次散射的 Aki 模型, 选取 2008 年 1 月—2009 年 12 月宁夏地震台网记录的 82 次 $M_L \geq 2.0$ 地震的数字地震波资料, 计算宁夏及邻区尾波 Q 值, 拟合 Q 值对频率的依赖关系。全区域数据结果为 $Q(f) = (212 \pm 87.62) \cdot f^{0.7584 \pm 0.19}$ 。与国内其它区域相比, 本区域 Q 值较低、对频率依赖性较高。结合区域地震地质构造特征及同期地震活动性将研究区划分为四个小震密集区: 吉兰泰地震区、银川地震区、卫宁同地震区和固海地震区, 分区对 Q 值进行数据统计, 对比表明, 尾波 Q 值较好地反映了小区地震活动特征。

关键词: Aki 模型; 尾波 Q 值; 频率依赖性; 宁夏及邻区; 小震密集区

中图分类号: P315.31 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2011)04-0370-06

Research on Q Value of Seismic Coda in Ningxia and Adjacent Region Based on Aki Model

SHI Hai-kuo¹, ZHU Xin-yun^{2,3}, HE Yong-zhong¹, ZHANG Li-heng¹

(1. Zhongwei Seismic Station of Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Ningxia Zhongwei 755000, China; 2. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China; 3. Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China)

Abstract: Based on the Aki model, adopting 82 digital wave datas of earthquake with $M_L \geq 2.0$ from January, 2008 to December, 2009, which were recorded by Ningxia earthquake network, the average Q values of seismic coda in Ningxia and adjacent region are calculated, and the relationship between Q value and frequency is polyfited. The whole region's result is $Q(f) = (212 \pm 87.62) \cdot f^{0.7584 \pm 0.19}$. Compared with other domestic regions, the Q value of seismic coda is relatively lower, but the dependence on frequency is higher. According to the regional seismic geology, tectonic characteristics and the homochronous seismic activity, the research region is divided into four concentrated minor-earthquake areas: Ji Lantai, Yin Chuan, Wei Ningtong and Gu Hai, and the Q values of four regions are counted. Comparison shows that Q values of seismic coda reflects the characteristics of seismicity in each area.

Key words: Aki model; Q value of seismic coda; Dependence on frequency; Ningxia and adjacent regions; Concentrated minor-earthquake areas

0 引言

地球介质中随机分布的各种非均匀体对原生波的散射形成了地震波记录中的尾波, 尾波衰减研究是地震地质构造及地震预测研究的重要内容。Aki (1969) 用单次散射模型解释尾波的形成^[1], 并在此

模型的基础上提出了通过尾波振幅随时间衰减确定尾波 Q 值的方法, 后来又得到不断的修正^[2]。这种方法原理简单、易于数据运算, 在 Q 值计算中被广泛使用。尾波 Q 值主要反映以震源和记录台站为两个焦点的椭球范围内的品质因子特性, 其结果作

为衡量地区构造活动的重要指标,用于刻画构造应力场变化。诸多研究表明,Q 值在地震活动水平高的地区低,尾波衰减快;在地震活动相对平静的地区高,相应尾波衰减慢;在古老的地质单元或构造运动稳定地区高;而在近代地质单元或构造活跃地区低。

本研究利用宁夏及邻近区域数字地震波资料,依据 Aki 模型计算尾波 Q 值,分析尾波 Q 值对频率依赖性特征,客观评估研究区介质衰减特征及区域地震活动性。

1 方法简介

本研究采用基于单一散射模型的尾波方法求解 Q 值。以某频率为中心频率,使用一定带宽滤波器滤波后的尾波振幅可以表述为

$$A(f,t) = S(f) \cdot t^{-u} \cdot e^{-\pi f t / Q(f)} \quad (1)$$

其中 $S(f)$ 为震源因子; t 为发震时刻算起的地震波流逝时间; u 为常数,体波 $u=1$,面波 $u=0.5$,本研究全部采用近震记录,因此 u 取值为 1; $Q(f)$ 为对应于中心频率点 f 的尾波 Q 值; $A(f,t)$ 是对应 t 时刻一个采样周期的幅度最大值。对式(1)两边取自然对数并整理变为

$$\ln(A(f,t) \cdot t^u) = \ln S(f) - a \cdot t \quad (2)$$

其中, $a = -\pi f / Q(f)$ 。上式表明 $\ln(A(f,t) \cdot t^u)$ 和 t 之间存在线性关系,因此可由式(2)数据拟合得出 a 。由此可求得对应频率点的尾波 Q 值,即

$$Q(f) = -\pi f / a \quad (3)$$

本研究在具体操作上首先对地震波尾波以 f 为中心频率, $f \pm 1/3f$ 为带宽,使用 6 阶 Butterworth 滤波器进行滤波,之后以 f 对应的周期 T 为采样步长,分别采集不同流逝时间 t 对应的 $A(f,t)$,将所有数据点代入式(2),用最小二乘法求解该频率的 Q 值。在研究整个区域地震波衰减总体特征时,先求该区域所有记录对不同频率的 Q 值,再对不同频率求 Q 值平均值,用平均值作为该区域对应频率的 Q 值,并由此数据拟合频率与 Q 值的关系式:

$$Q(f) = Q_0 f^\alpha \quad (4)$$

2 观测资料

本研究使用宁夏及邻近的内蒙、甘肃台网的部分台站记录,各台的基本情况见表 1 及图 1。采用数字地震波记录,仪器采样率为 100 Hz(部分台站采样率在此期间由 50 Hz 改为 100 Hz),对应得奈奎斯特频率为 50 Hz。选取地震记录起止时间在

2008 年 1 月—2009 年 12 月期间,地震发生在宁夏境内及周边,震级在 $M_L 2.0 \sim 4.7$ (取自宁夏台网月报目录),波形记录清晰,噪声水平满足计算条件。

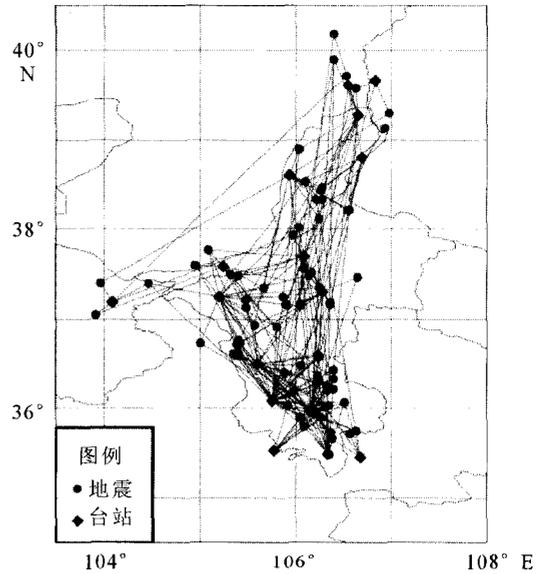


图 1 地震及台站分布(直线表示采用的地震记录的地震射线路径)

Fig. 1 Distribution of earthquake epicenters and seismic stations.

3 数据处理及结果

3.1 数据处理

本研究分析频率段为 4~18 Hz,间隔 1 Hz,对应中心频率 f ,带宽取 $[2/3f, 4/3f]$,使用 6 阶 Butterworth 带通滤波器^[3]进行滤波。根据朱新运等^[5-6]的研究结果,采用每次事件记录之前 3 秒钟的噪声平均信号幅度作为标准噪声信号,与等长时间尾波信号平均幅度相比,设置信噪比阈值为 2,大于 2 表示在数据计算上结果可靠。由于不同台站场地条件不同,可能获取的尾波可用段也不同,对应流逝时间也不同。不同的流逝时间反映不同深度的 Q 值,为保证采样深度基本相当,即尾波流逝时间基本一致,在满足计算要求的情况下限制尾波流逝时间在 80 ± 5 s 范围内。这样共挑选出符合条件的 82 次地震的记录 195 条,对同一地震记录三分向数据分别求解 Q 值,同时给出各频率三分向结果的平均值,并采用三分向数据的平均值作为判断该地震波衰减特征的 Q 值指标(计算实例见图 2),最后拟合 Q 值随频率的变化关系。

3.2 数据结果

利用 195 条地震记录,使用 6 阶 Butterworth 滤

表 1 宁夏测震台网台站参数表

序号	台网代码	台站代码	台名	地震计深度/m	台基类型	地震计	数采	采样率
1	NX	SZS	石嘴山	0	花岗岩	FBS-3	EDAS-C24	100
2	NX	TLE	陶乐	245	粘土	JDF-2	CMG-DM24	100
3	NX	YCH	银川	0	花岗岩	CTS-1	EDAS-C24	100
4	NX	NSS	牛首山	2	灰砂岩	CMG-3ESPC	CMG-DM24	100
5	NX	ZHW	中卫	0	砂岩夹灰岩	FBS-3	EDAS-C24	100
6	NX	TXN	同心	0	板岩	FBS-3	EDAS-C24	100
7	NX	XSH	香山	0	砂岩	CMG-3ESPC	CMG-DM24	100
8	NX	HYU	海原	0	大理石岩	BBVS-60	EDAS-24IP	100
9	NX	XJI	西吉	0	粉砂岩	CMG-3ESPC	CMG-DM24	100
10	NX	GYU	固原	0	钙质泥岩	CTS-1E	EDAS-24L6	100
11	NX	JYU	泾源	0	砂岩	FBS-3	EDAS-C24	100
12	NM	WUH	乌海	0	片麻岩	BBVS-60	EDAS-24IP	100
13	GS	JTA	景泰	0	砂页岩	BBVS-60	EDAS-24IP	100
14	GS	JNT	静宁	0	沉积岩	CMG-3ESP	CMG-DM24	100
15	GS	PLT	平凉	0	砂砾岩	BBVS-60	EDAS-24IP	100

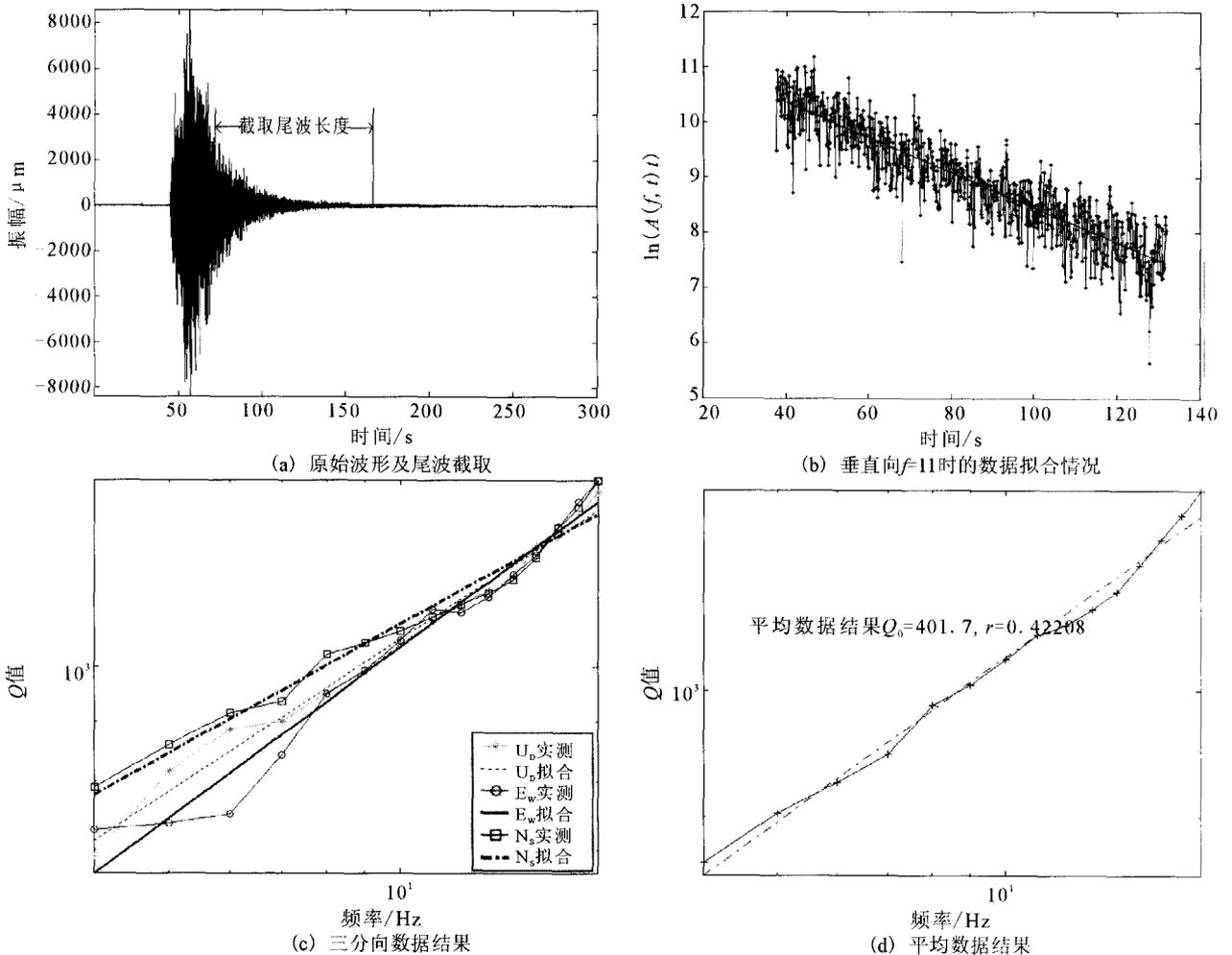


图 2 2008 年 1 月 1 日 04 时 22 分 $M_L=2.7$ 地震香山台计算结果

fig. 2 The calculating result of $M_L=2.7$ earthquake recorded by Xiangshan Station occurred at 04:22 on January 1, 2008.

波器进行滤波,动态采样^[6],尾波流逝时间在 80 ± 5 s,用椭球体公式计算尾波最大采样深度 92 km,每条记录以 4 至 18 整数频率点为中心频率,计算 15

个频率点数据,对每个频率的所有 Q 值求平均值作为该频率点研究区域的 Q 值,拟合平均 Q 值与对应频率之间的关系其结果为(图 3):

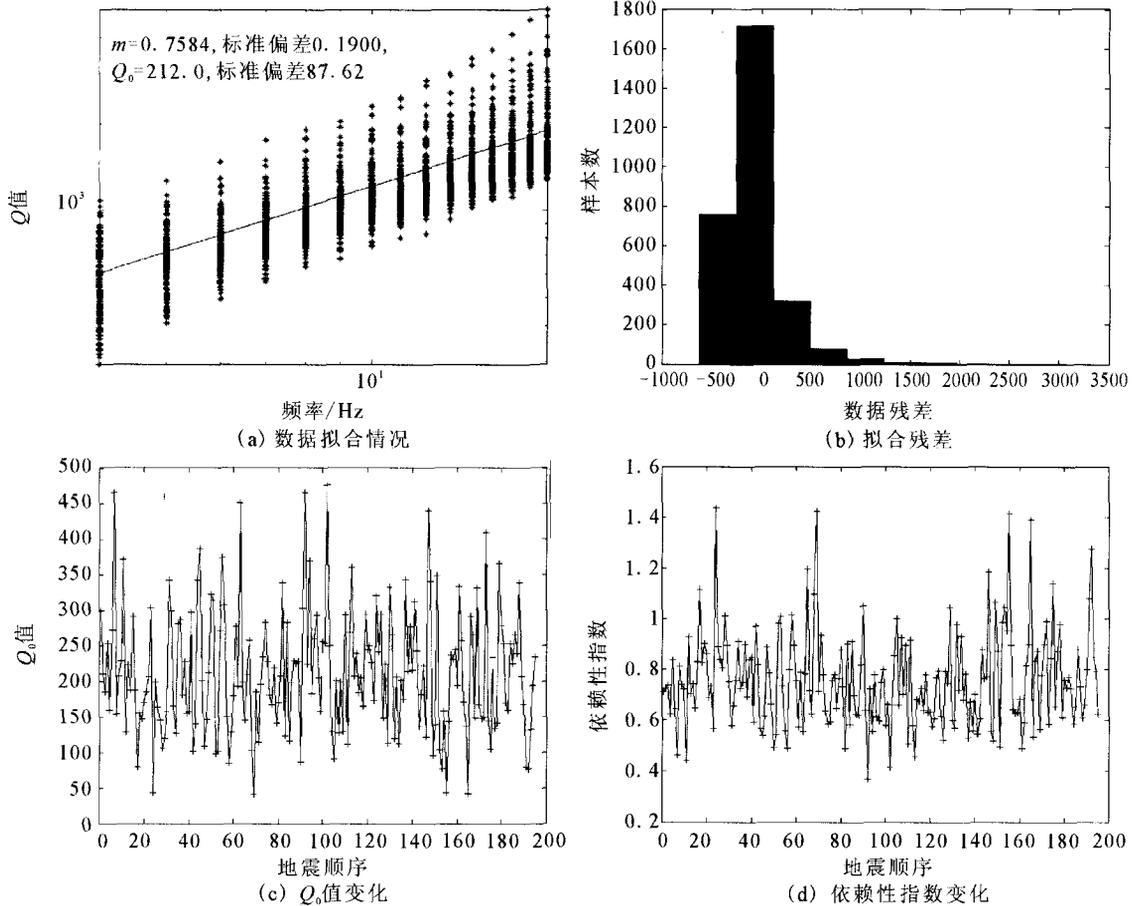


图 3 Q 值与频率的关系

Fig. 3 Relationship between Q value and frequency.

$$Q(f) = (212 \pm 87.62) \cdot f^{0.7584 \pm 0.19} \quad (5)$$

地质构造上,宁夏北部属银川—吉兰泰拉张构造区,由 NE、NNE 走向的两堑夹一垒平行组合而成,地貌上分别为山地和盆地。而宁夏南部则属于青藏块体北东缘弧形构造区,活动断裂分割山地和盆地,走向自西而东由 NWW 或近 EW 逐渐过渡为

NW、NNW,甚至近 NS^[7]。结合宁夏及周边地震地质特征及同期小震空间分布特点,将研究区自北向南划分为四个小震密集区:吉兰泰地震区(主要为内蒙古磴口至乌海小震密集带)、银川地震区、卫宁同地震区和固海地震区^[7],分别统计 Q 值对频率的依赖关系,结果如表 2,图 4 所示。

表 2 小震密集区 Q₀ 值及其对频率的依赖性指数分布

小震密集区	Aki 模型(流逝时间:80 s)		
	记录条数	Q ₀	η
吉兰泰地震区(N39.2°—40.5°,E104.5°—107.5°)	14	274.2	0.663 6
银川地震区(N37.7°—39.2°,E105.7°—107.0°)	17	252	0.742 2
卫宁同地震区(N37.0°—37.7°,E104.0°—107.0°)	55	213.4	0.724 6
固海地震区(N35.2°—37.0°,E105.0°—107.0°)	122	194.2	0.768 8

4 讨论和结论

(1) Q 值大小反映了地震波衰减程度,Q 值对频率的依赖程度与地壳介质均匀程度有关,依赖程度越大,地壳介质均匀程度越低,相关区域构造活动越强烈,地震活动水平越高。该研究区由 1 Hz 频率对应得到的 Q₀ = 212,对频率的依赖性指数 0.758 4

(图 3)。与国内不同区域 Q₀ 值及其对频率的依赖性程度相比(表 3)^[5,8-12],Q₀ 值相对较低,地震波衰减较快,且其对频率表现出较强的依赖性。由此可以认为,研究区区域构造活动较强,地震活动水平较高。

(2) 对宁夏及邻区进行分区 Q₀ 值计算,结果为:宁夏及邻区 Q₀ 值整体呈北高南低分布,宁夏北

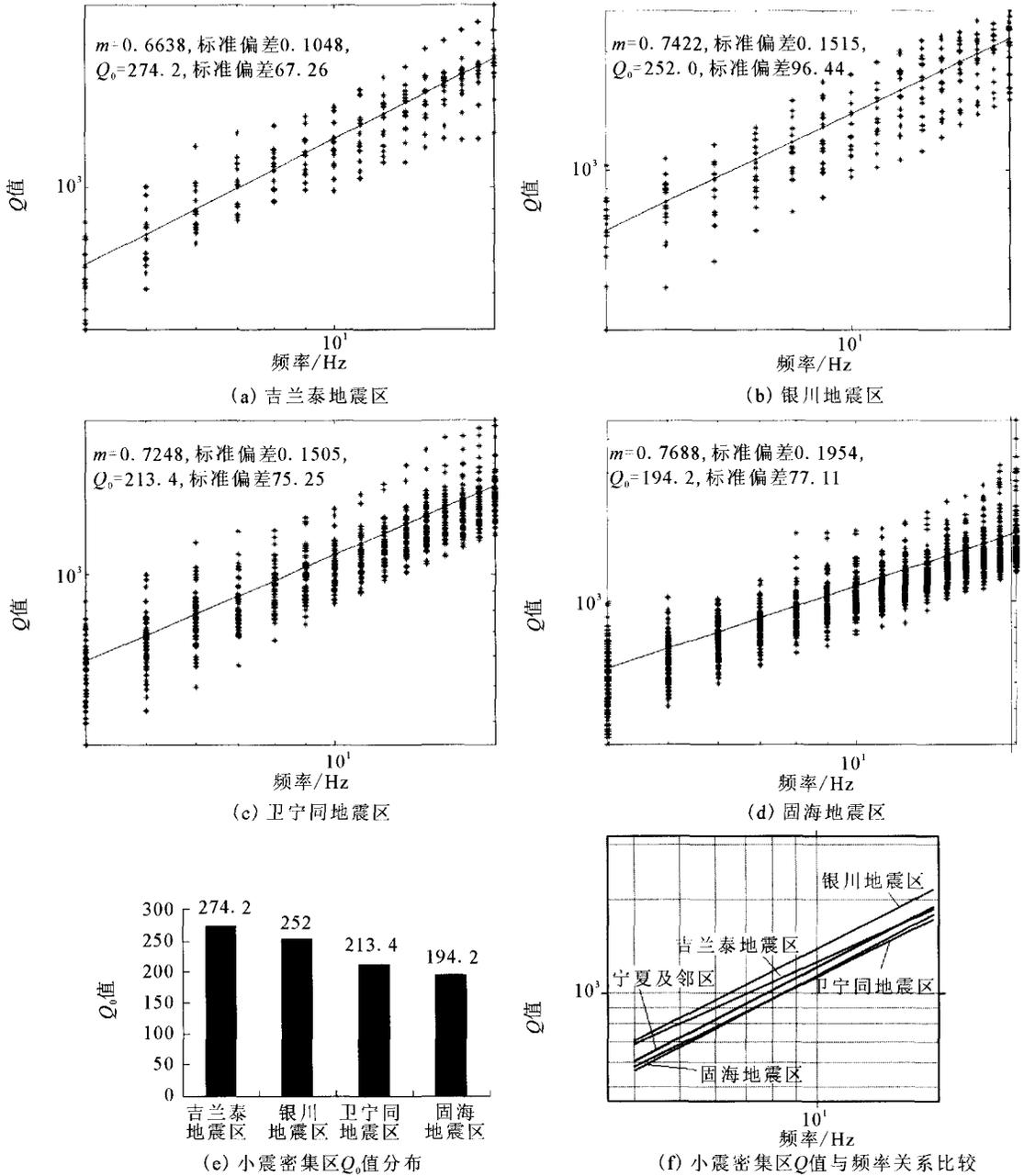


图 4 小震密集区 Q 值与频率的关系

Fig. 4 Relationships between Q value and frequency in concentrated minor-earthquake areas.

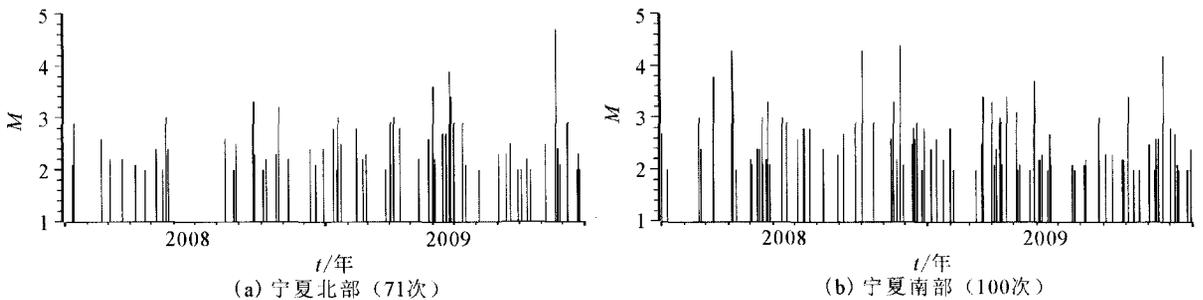


图 5 宁夏及邻区 2008—2009 年 $M_L \geq 2.0$ 地震 $M-t$ 图

Fig. 5 $M-t$ diagram of Ningxia and adjacent regions' earthquakes with $M_L \geq 2.0$ in 2008—2009.

表3 Q 值与频率关系的国内相关研究结果比较

序号	地区	Q(f)		流逝时间/s	作者	
		Q ₀	η			
1	北京	217	0.74	60~90	马云生	
2	浙江	212	0.62	80	朱新运	
3	青海玉树	82.3	0.876	30~70	王培玲	
4	粤西	260~370	0.0~0.2	200	梁芳	
5	九江—瑞昌	64.1	0.977 9	30	陈俊华	
6	九江—瑞昌	77.5	0.96	40~44	吕坚	
7	宁夏	全区	212	0.758	80	本研究
8		吉兰泰地震区	274.2	0.663 6	80	本研究
9		银川地震区	252	0.742 2	80	本研究
10		卫宁同地震区	213.4	0.724 6	80	本研究
11		固海地震区	194.2	0.768 8	80	本研究

部的吉兰泰地震区、银川地震区较高,而宁夏南部固海地震区和卫宁同地震区较低,这与赵卫明等^[13]计算结果比较一致。由宁夏台网地震月报可以看出,2008—2009年期间,宁夏南部地区2.0级以上地震活动水平明显高于北部地区(图5),这一点映证了Q值与相关区域地震活动水平之间的依存关系。

(3) Aki等认为受介质几何非均匀性控制的低频率端为5 Hz以下,本研究三分向数据不一致段频率高于5 Hz,最高可达8 Hz。朱新运等^[5]对此解释为不同地区受介质几何非均匀性控制的低频率端范围是不同的。在选取资料的两年时间段里,由1 Hz频率对应得到的Q₀值及对频率的依赖性指数都没有趋势性变化,说明区域应力没有明显改变。

尾波Q值计算软件由浙江省地震局朱新运提供,笔者在浙江省地震局作访问学者期间,在朱新运老师指导下完成本研究工作,计算所用波形数据由宁夏地震局测震台网中心提供,在此深表谢意。

[参考文献]

- [1] Aki K. Analysis of seismic coda of local earthquakes as scattered wave[J]. J. Geophys. Res., 1969, 74: 615-631.
 [2] Aki K, Chouet B. Origin of Coda wave: source, attenuation

and scattering effects[J]. J. Geophys. Res., 1975, 80: 3322-3342.

- [3] 朱新运. 影响尾波Q值数据结果的算法因素分析[J]. 东北地震研究, 2006, 22(4): 8-13.
 [4] Rautain T G, Khalturin V I. The use of the coda for determination of earthquake source spectrum[J]. Bull. Seis. Soc. Amer., 1978, 75: 1371-1382.
 [5] 朱新运, 张帆. 浙江及邻区尾波Q值研究[J]. 西北地震学报, 2006, 28(2): 108-113.
 [6] 朱新运, 刘杰, 张帆. 基于Aki模型的近震S波尾波Q值求解及分析软件研制[J]. 地震研究, 2006, 29(1): 76-80.
 [7] 杨明芝, 马禾青, 廖玉华. 宁夏地震活动与研究[M]. 北京: 地震出版社, 2007.
 [8] 马云生, 张天中, 张焕生. 北京及其周围地区尾波Q值分布特征的研究[J]. 地震学报, 1995, 17(4): 448-458.
 [9] 王培玲, 孙洪斌, 陈玉华. 青海玉树单台地震序列的尾波Q值研究[J]. 高原地震, 2007, 19(3): 21-24.
 [10] 梁芳, 林美, 江秋云. 粤西地区的地震尾波Q值和尾波衰减特征[J]. 华南地震, 1989, 9(2): 1-13.
 [11] 陈俊华, 甘家思. 九江—瑞昌5.7级地震余震尾波Q_c值分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(3): 65-68.
 [12] 吕坚, 朱新运, 高建华, 等. 江西九江—瑞昌震区的尾波衰减特征初探[J]. 地震, 2006, 26(4): 15-21.
 [13] 赵卫明, 刘秀景, 马禾青. 宁夏及邻区尾波Q值分布特征[J]. 华南地震, 2002, 22(1): 23-27.