

张锦玲, 朱新运, 马起杨. 2019. 宁夏地区 Lg 波衰减及场地响应特征. 地震学报, 41(4): 425-434. doi: 10.11939/jass.20180134.
Zhang J L, Zhu X Y, Ma Q Y. 2019. Lg-wave attenuation and site response in Ningxia region. Acta Seismologica Sinica, 41(4): 425-434. doi: 10.11939/jass.20180134.

宁夏地区 Lg 波衰减及场地响应特征*

张锦玲¹⁾ 朱新运^{2), †} 马起杨²⁾

1) 中国银川 750001 宁夏回族自治区地震局

2) 中国杭州 310013 浙江省地震局

摘要 本文采用 2008—2017 年宁夏及邻区内 15 个数字地震台站记录的 131 次地震的波形资料, 基于地震波衰减与场地响应联合反演方法, 分析频率介于 1—7 Hz 之间的 Lg 波衰减及场地响应. 采用 2.2—3.6 km/s 的速度窗截取了 1 069 条 Lg 波, 计算得到 Lg 波各分量的地震波衰减品质因子 $Q(f)$ 与频率 f 之间的关系. 结果显示: Lg 波垂直、东西及南北向各分量的 Q_0 分别为 237.1, 201.8 及 245.9; $Q(f)$ 对 f 的依赖性指数分别为 0.44, 0.52 及 0.44, 该结果与全球其它地震活跃地区的相应研究结果相一致. 对 $Q(f)$ 在时间域的分析结果表明, 研究时段内该地区地壳介质的衰减属性并未改变, 15 个台站的最大场地响应幅值不大于 6.

关键词 宁夏地区 Lg 波衰减 衰减参数 场地响应 联合反演
doi: 10.11939/jass.20180134 中图分类号: P315.3⁺1 文献标识码: A

Lg-wave attenuation and site response in Ningxia region

Zhang Jinling¹⁾ Zhu Xinyun^{2), †} Ma Qiyang²⁾

1) Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China

2) Zhejiang Earthquake Agency, Hangzhou 310013, China

Abstract: Based on 131 seismic waveform data recorded by 15 digital seismic stations in Ningxia region and its neighboring areas from 2008 to 2017, this paper analyzed Lg wave attenuation and site response at the frequencies ranging from 1 to 7 Hz by using the combined inversion method of seismic wave attenuation and site response. The relationship between the seismic wave attenuation quality factor $Q(f)$ and the frequency f for each component was calculated by using 1 069 Lg waveforms in the velocity window of 2.2—3.6 km/s. The results show that the Q_0 of vertical, west-east and north-south components are 237.1, 201.8 and 245.9, and the frequency exponent of the $Q(f)$ are 0.44, 0.52 and 0.44, respectively. The result of this area is consistent with the results of the other seismically active regions in the world. Furthermore, in time domain the analysis of $Q(f)$ suggests that the attenuation characteristics of crustal medium in this region do not change during the studied period, and the maximum response amplitude of 15 stations was not more than 6 in the region.

* 基金项目 地震科技星火计划(XH18018)项目资助。
收稿日期 2018-11-12 收到初稿, 2019-05-08 决定采用修改稿。
† 通信作者 e-mail: zhuxinyun@126.com



Key words: Ningxia region; Lg wave attenuation; attenuation parameters; site response; joint inversion

引言

宁夏回族自治区位于南北地震带的北段,该地区地质构造复杂,地壳运动强烈,活动断裂发育,历史地震频发,震源类型多样(张国民等, 2006; 张致伟等, 2015),是地震学界关注的热点地区之一. 马禾青等(2011)使用膨胀非均匀性(extensive-dilatancy anisotropy)模型分析了宁夏地区的应力场及浅层裂隙特征,结果显示宁夏南部的剪切波快慢波到时差普遍高于宁夏北部,而宁夏中部台站的剪切波分裂快波偏振方向和快慢波到时差在 2008 年之后均出现了较大变化;张进等(2007)认为宁夏中南部普遍发育着滑塌堆积,且在大小尺度上表现出显著的不均匀性,而这种不均匀性对地震波响应的表现特征,是一个值得探讨的问题. 秦四清等(2010)基于孕震断层多锁固段脆性破裂理论与孕震时空区域划分原则,利用历史地震资料对宁夏地区主要孕震区的地震趋势进行了分析,其结果表明与宁夏地区相关的海源、共和等区域在短时间段内发生破坏性地震的可能性较低.

地震波衰减和场地响应都是地震学研究的主要内容. 研究人员已通过尾波方法使用不同时段的地震波资料分别研究了宁夏北部、中部及南部的地震波衰减特征(赵卫明等, 2002; 师海阔等, 2011, 2016);而与宁夏毗邻的青藏高原,地震波衰减方面的研究成果也颇为丰富(McNamara *et al.*, 1996; Fan, Lay, 2002, 2003a, b). 但关于研究区内地震台站场地响应的研究尚缺,同时在该地区使用不同方法研究地震波衰减也是一项很有意义的工作.

地震波在传播过程中的路径属性通过其衰减来呈现,而近场地地表介质对到达台站的地震波能量的放大或吸收效应则以场地响应的形式来表现. 地震波在传播路径上的衰减计算广义上可以分为两类:一类是基于同一台站记录,对应不同流逝时间的地震波振幅衰减来计算,处理数据中通常利用地震波的尾波成分并借助一定的散射模型如 Aki 模型(Aki, 1969; Aki, Chouet, 1975)、Sato 模型(Sato, 1977; Gao *et al.*, 1983a, b)等;另一类则基于不同台站记录,对应于不同震中距的振幅(或能量)衰减来计算(Chun *et al.*, 1987, 2009; Aleqabi, Wyssession, 2006; Zhu, Chen, 2012; Zhu, 2014). 场地响应的计算方法主要有标准谱比法(Lachet *et al.*, 1996; Parolai *et al.*, 2010)和水平与垂直向波谱比法(Parolai *et al.*, 2000, 2010; Sylvestre *et al.*, 2006),前者需要在有效频带范围内存在一个已知场地响应值的参考台站,后者则需要假设地震台站的垂直向不存在放大作用这样一个值得商榷的前提.

地震波路径衰减只与地震波传播的距离有关,而场地响应则反映近场地介质的属性特征,与地震波传播的距离无关. 基于这一原理, Zhu 和 Chen (2012)以及 Zhu (2014)和朱新运(2016)利用 Lg 波波谱比联合反演获得场地响应和路径衰减参数的方法,对华北、华东等区域进行了地震波衰减及场地响应分析. Lg 波是复杂的地壳导波,是地壳浅层多次反射的 S 波,在地震波记录图上几乎无离散,但其能量在地方震或区域地震事件中占有主导地位. 大陆地区 Lg 波幅值与距离的关系稳定,是研究地壳介质衰减的优选成分, Fan 和 Lay (2002)认为大陆地壳岩石断裂是引起 Lg 波衰减的主要原因,因此 Lg 波衰减可用于区域地震活动趋势研判、构造分析等(马志江等, 2016). 本研究拟利用宁夏及邻区地震波记录,研究该地区地壳介质衰减特征并评估地区内地震台站场地响应特征,以期对宁夏地区现今地震活动危险性 & 区域地壳现今构造运动特征等方面研究提供参考.

1 研究区构造背景

宁夏地区位于祁连地槽褶皱系与华北地台西部边缘的过渡带,其北部为吉兰泰—银川拉张构造区的一部分,由鄂尔多斯西缘逆冲断褶带、贺兰山逆冲推覆构造带及银川新生代陷盆地组成,地壳沉降、沉积厚度较大,稳定性较差,地貌地形主要表现为山地、山间盆地及系列左旋位错的山脊,地形地貌反差显著(Zhang *et al.*, 1991; 向宏发等, 1998);其南部的弧形推覆带则是鄂尔多斯西缘、阿拉善地块南缘及北祁连褶皱带东段的交会区域(李天斌, 1999).宁夏地区南北部的地质构造及地球物理场均存在一定的差异(马禾青等, 2011).由于受到不同方向水平构造应力的作用,区内经、纬向构造体系清晰,其中贺兰山构造带纵贯宁夏东部地区,地形地貌表现为坳陷与隆起,而天山—阴山中段南缘由南向北逆冲并顺扭.宁夏地区存在的较大规模的活动断裂包括贺兰山断裂带、黄河断裂带、贺兰山西麓断裂及东麓断裂、银川—平罗隐伏断裂、中卫—同心断裂和海原断裂、三关口—牛首山—固原断裂等.公元876年以来,区内共发生过15次 $M>6$ 的破坏性地震,其中,1920年12月16日海原 $M8.5$ 地震是强度最大的地震,造成23万余人死亡(秦四清等, 2010),海原断裂是此次地震的发震断裂,该地震致使地块之间产生了强烈的挤压和错动,造成的地表破裂由西北向东南延伸达到220 km(Zhang *et al.*, 1991).

2 反演方法和数据处理

本文基于地震波谱比进行路径衰减与场地响应联合反演,由此得到路径衰减和场地响应参数,该方法在相关文献(朱新运, 陈运泰, 2007; Zhu, Chen, 2012; Zhu, 2014)中已有详细介绍,此处不再赘述.本文依据该方法截取所选地震波记录中的Lg波成分,并依次进行仪器校正、几何衰减校正;然后计算同一地震不同台站的记录谱之比,消除震源因子.本研究未考虑地震波辐射方向性因子,理论上基于:①已有研究已表明Lg波对地震辐射方向性响应很小(Zhang *et al.*, 2002; Mitra *et al.*, 2006);②资料选择上,所使用的地震为中小地震,其震源可以被近似为点源,因而其方向性影响可以忽略(Zhu, Chen, 2012; Zhu, 2014).

本文分析使用2008年1月至2017年11月期间宁夏回族自治区及内蒙古自治区内15个数字地震台(其中井下台2个)的地震波形记录.由图1可见,台站至震中的地震波射线很好地覆盖了整个研究区.台站配备宽频或甚宽频仪器,均为三分向记录仪器,采样率为100 Hz,宽频带仪器对地震波响应在64 s—40 Hz平坦,甚宽频带仪器对地震波响应在128 s—40 Hz平坦,仪器性能可满足研究需要.处理数据前,先对每条地震记录进行仔细检查,剔除存在断记、突跳等的非正常波形,采用地震波速度窗(2.2—3.6 km/s)方法提取Lg波(Murphy, Bennett, 1982; Zhu, Chen, 2012; Zhu, 2014).本文采用速度窗的高端速度为3.6 km/s,与同类研究中采用的高端速度一致(Murphy, Bennett, 1982; Campillo *et al.*, 1985, Zhu, Chen, 2012; Zhu, 2014);低端速度选取为2.2 km/s,略低于上述研究相应的速度值.Campillo等(1985)分别使用2.3—2.6 km/s, 2.6—3.1 km/s和3.1—3.6 km/s的速度窗来研究Lg波衰减系数,其结果表明速度窗对研究结果的影响很小,可以忽略.本研究同样使用不同速度窗进行了测试,结果显示:若速度窗过短,近台记录上截取到的波形会很短,谱的离散性会很大,数据不稳定;在波谱稳定的情况下,Lg波的衰减参数与速度窗大小无明显的相关性.最后,用快速傅里叶变换计算波形对应的傅里叶谱,并以3个采样谱点长度作为窗长依次对傅里叶谱进行平滑处理.

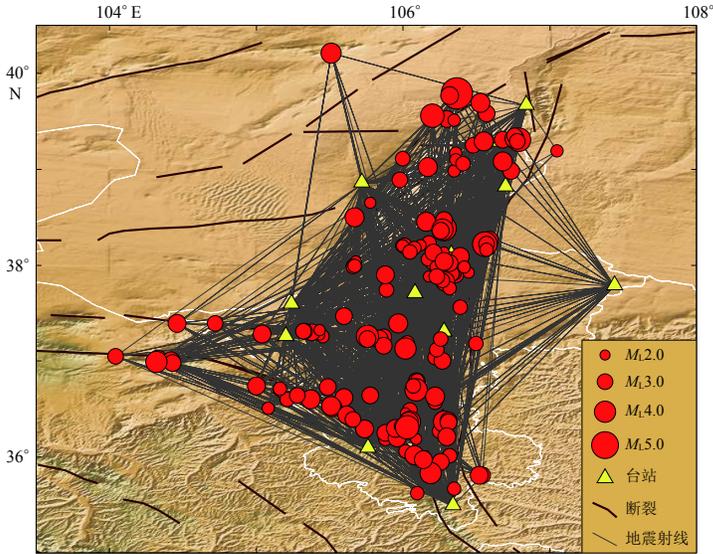


图1 地震台站、震中及地震射线

Fig. 1 Distribution of seismic stations, epicenters and seismic rays

3 结果分析

根据计算条件，截取地震信号未到前3 s的波形作为噪声，依次计算其等长地震波的振幅均方根与噪声振幅均方根之比，即信噪比。首先，设定信噪比大于2作为截取有效波形的基本条件；其次，剔除断记、波形畸变等非正常波形；最后获得了131次地震在15个台站的1 069条记录。

3.1 衰减系数

分析使用的频率范围为1—7 Hz，间隔为0.2 Hz，共31个频率点，计算每个频率点对应的 $Q(f)$ 值，并进行形如 $Q(f) = Q_0 f^\mu$ (Chun et al, 1987)的最小二乘法拟合，其中 μ 为依赖性指数，最终获得的地震波衰减参数结果如图2所示，其中：垂直向为

$$Q(f) = 237.1f^{0.44}; \tag{1}$$

东西向为

$$Q(f) = 201.8f^{0.52}; \tag{2}$$

南北向为

$$Q(f) = 245.9f^{0.44}. \tag{3}$$

3.2 场地响应

本文使用15个台站的地震波记录，得到的台站场地响应均小于6(图3)，大部分台站多数频率的场地响应幅值介于1—2之间，未表现出明显的放大作用，同一台站不同分量的场地响应幅值差异为1—2。灵武台(LWU)和陶乐台(TLE)是土层台，台基为黏土，两台站的传感器埋深分别为248 m和245 m，这两个台未表现出异于其它台站台基的响应特征；乌海台(WUH)的台基岩性为片

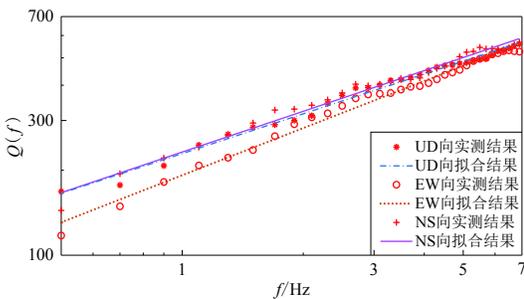


图2 衰减参数 $Q(f)$ 与频率 f 之间的关系

Fig. 2 The relationship between the attenuation parameter $Q(f)$ and frequency f

岩。灵武台(LWU)和陶乐台(TLE)是土层台，台基为黏土，两台站的传感器埋深分别为248 m和245 m，这两个台未表现出异于其它台站台基的响应特征；乌海台(WUH)的台基岩性为片

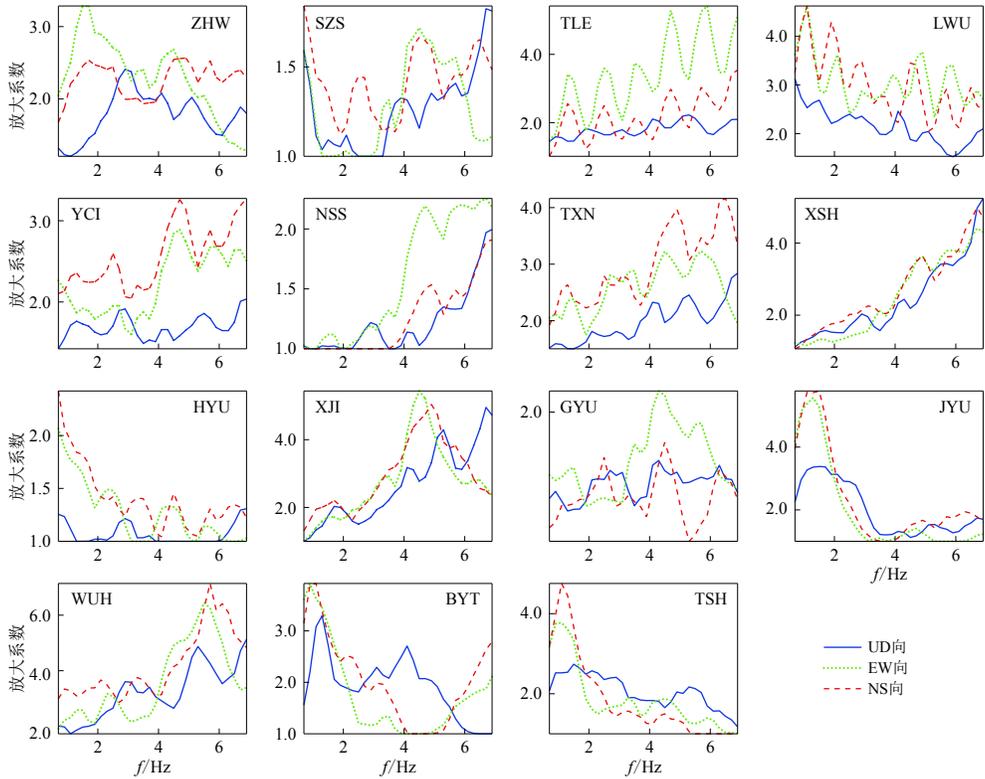


图 3 15 个台站的场地响应

Fig. 3 Site responses of 15 stations

麻岩,与其它台站的台基岩性不同,该台站东西与南北分量在 6 Hz 频率点附近时的场地响应幅值高于 6.

3.3 结果稳定性检验

Erickson 等(2004)和朱新运(2016)分别利用样本重构的方法对解的稳定性进行了检验. Erickson 等(2004)在研究美国大陆 Lg 波衰减参数时发现当剔除样本量达到 60% 时仍然可以得到稳定的解;朱新运(2016)在研究华北盆地地震波衰减时删除样本量达到 70%,结果偏离达到 8%. 根据本研究算法,样本重构数据量大小取决于的总数据量.在朱新运(2016)的研究中,总数据量有 1000 多条,当剔除样本达到 70% 时,重构样本量仍有 300 多条.

本研究共有 131 个地震事件,获得波形资料 1 069 条,按 25% 随机删除样本并重采样 2 000 次进行计算,得到的垂向结果为

$$Q(f) = (237.1 \pm 9.59) f^{0.44 \pm 0.017}; \quad (4)$$

东西向为

$$Q(f) = (201.8 \pm 9.18) f^{0.52 \pm 0.18}; \quad (5)$$

南北向为

$$Q(f) = (245.92 \pm 12.24) f^{0.44 \pm 0.02}. \quad (6)$$

进行样本重构的结果如图 4 和图 5 所示,可见获得的衰减及场地响应的标准偏差均不大于 5%.

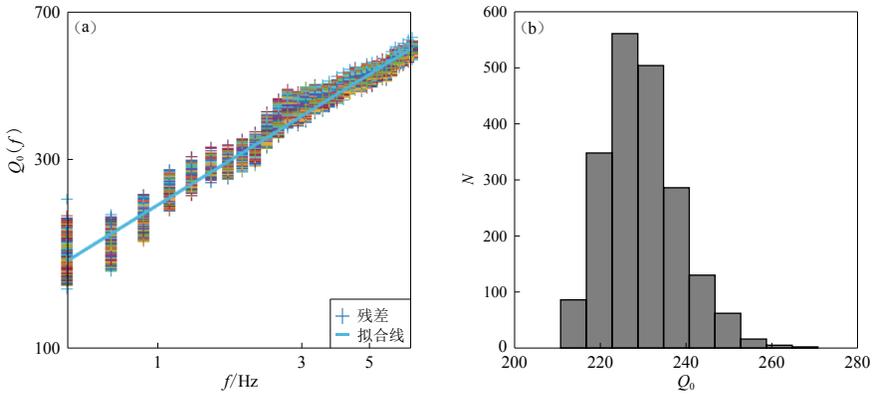


图 4 2 000 次反演计算的南北分量的 Q_0 结果

(a) 衰减参数 Q_0 与频率 f 的关系; (b) Q_0 的正态分布

Fig. 4 Results of 2 000 inversions for Q_0 on the north-south components

(a) The relationship between Q_0 and frequency f ; (b) Normal distribution of Q_0 value

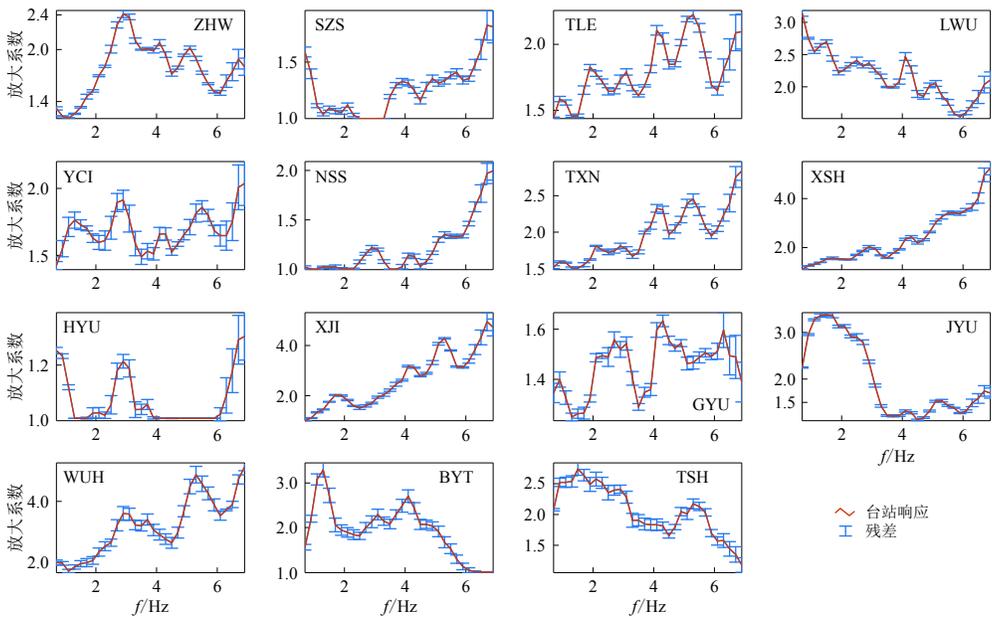


图 5 台站场地响应及对应残差

Fig. 5 Site responses of the stations and the associated residual errors

4 地区衰减参数的时变性

在解的检验环节中显示, 删除样本量的 25% 时, 标准偏差在 5% 左右. 据此本研究将样本量的 75% 作为一个数据组, 即大约 100 次地震的记录. 每个数据组的最后一次地震发生的时间作为衰减参数时变结果对应的时间, 在全部数据段时间内依次以一个数据组滑动采样, 获得一组时变计算结果, 如图 6 所示. 由该图可见在全部时段(2008 年 1 月至 2017 年 12 月)内衰减参数无较大波动.

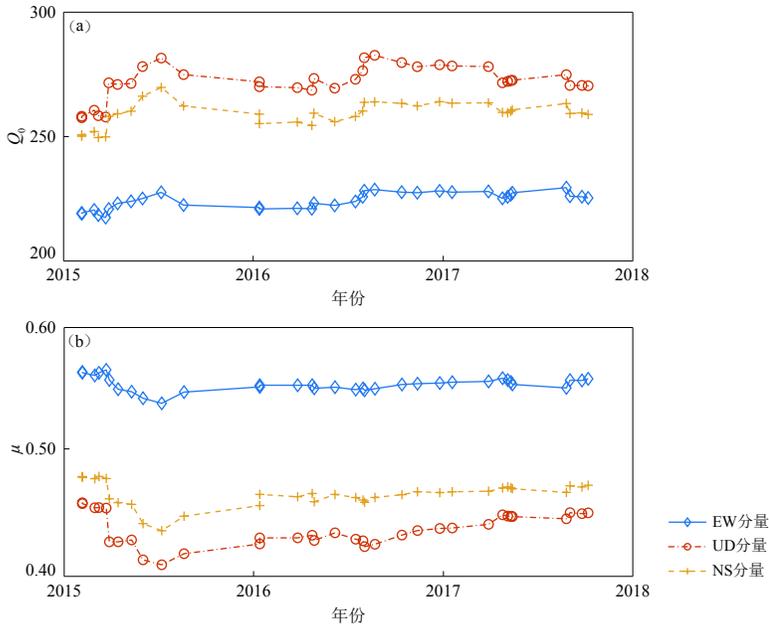


图 6 地震波衰减参数 Q_0 (a) 和依赖性指数 μ (b) 的时变曲线

Fig. 6 The time-varying curves of the attenuation parameter Q_0 (a) and the frequency exponent μ (b) of the seismic wave

5 讨论与结论

Lg 波是多次反射的 S 波, 是地区地震波记录的主要成分, 最远可在 1 000 km 以上震中距台站上记录到, 但台站震中距最小为多少时可作为地震波优势成分被记录, 在地震学界却无统一标准. Hasegawa (1985) 在加拿大地盾开展 Lg 波衰减研究, 结果显示, 在震中距大于 2 倍地壳厚度的地方, Lg 波成分已经非常明显. 在基于 Lg 波的地震波衰减研究中, Domínguez 等 (1997) 使用 Lg 波记录的台站的最小震中距为 285 km, 而 Shi 等 (1996) 在研究阿巴拉契亚中心山脉区域 Lg 衰减时使用资料的最小震中距为 41 km; Zhu 和 Chen (2012) 及 Zhu (2014) 使用 Lg 波研究中国大陆华北与华东区域的地震波衰减参数时, 所使用资料的最小震中距均为 100 km. 根据本研究的波形特征, 本文选择资料的台站最小震中距为 100 km.

赵卫明等 (2002) 和师海阔等 (2011, 2016) 曾采用尾波方法, 基于地震波振幅与流逝时间之间的相关关系, 使用 Aki 模型或 Sato 模型 (Aki, 1969; Sato, 1977; Domínguez, Rebollar, 1997) 计算了宁夏地区的地壳介质衰减 Q 值 (Q_c). 在使用尾波进行 Q 值计算的研究中, 尽管所使用的尾波模型不同, 但得到研究结果一致, 即: 宁夏地区地震波衰减快, 衰减 Q 值低, 属于构造活跃区. 这些特征也与本地区的地震活动现状相符.

本研究使用地震波谱比构造数学模型, 通过衰减与场地响应联合反演 (Zhu, 2014) 获得了地震波衰减参数, 同时也得到了地震台站的场地响应. 该方法基于路径衰减与震中距相关、而场地响应与震中距无关这一地震波传播的物理本质, 本研究在资料挑选及方法使用上严格参考朱新运等 (Zhu, Chen, 2012; Zhu, 2014; 朱新运, 2016) 研究的过程; 研究结果与中国大陆其它地区结果的比较表明: 宁夏地区 Q_0 低于华北 (京津冀) 地区 (Zhu, Chen, 2012) 而高于华东区域相应值 (Zhu, 2014). 就现今地震活动情况比较, 华北京津冀地区的地震活动

水平最高, 华东区域地震活动水平最低. 由本文结果与全球地震较活跃构造区结果对比可知, 宁夏及邻区与墨西哥俯冲带(Domínguez *et al.*, 1997)、加利福尼亚南内华达山脉(Paul *et al.*, 1996)、南加利福尼亚(Benz *et al.*, 1997)等的结果基本一致. 研究区是中国大陆地震活动水平较高的地区, 说明本文获得的数据结果是合理的. 地区 Lg 波 Q 值的时变特征分析显示, 该地区的衰减参数在数据采样时段内稳定, 说明地区地壳介质的均匀性属性没有可以识别的变化, 这也印证了秦四清等(2010)关于宁夏相关地区在短时段内发生破坏性地震的可能性较低的预测结论.

尽管宁夏地区南北地球物理场及构造活动都存在较大差异, 但由于受地区资料条件所限, 本文将宁夏地区作为一个整体加以研究, 其结果只能大尺度地反映该地区的地震波衰减特征, 但使用本方法进行探索性研究对该地区后续地震活动分析、地震危险性评判仍有较大意义.

参 考 文 献

- 李天斌. 1999. 宁夏南部弧形推覆构造带特征及演化[J]. *地质力学学报*, **5**(3): 22–27.
- Li T B. 1999. The feature and formation mechanism of arciform thrust-nappe structure zone of the southern Ningxia[J]. *Journal of Geomechanics*, **5**(3): 22–27 (in Chinese).
- 马禾青, 丁志峰, 常利军, 高武平, 蔡新华. 2011. 宁夏地区地壳介质地震各向异性特征[J]. *地球物理学进展*, **26**(1): 61–70.
- Ma H Q, Ding Z F, Chang L J, Gao W P, Cai X H. 2011. Features about seismic anisotropy of the crustal medium in Ningxia region[J]. *Progress in Geophysics*, **26**(1): 61–70 (in Chinese).
- 马志江, 钟羽云, 韩用兵, 叶建青, 张震峰, 林胜法, 徐梦林, 刘倩倩. 2016. 温州珊溪水库诱发地震构造条件[J]. *地球科学*, **41**(8): 1413–1423.
- Ma Z J, Zhong Y Y, Han Y B, Ye J Q, Zhang Z F, Lin S F, Xu M L, Liu Q Q. 2016. The tectonic conditions of Shanxi reservoir induced earthquake in Wenzhou[J]. *Earth Science*, **41**(8): 1413–1423 (in Chinese).
- 秦四清, 薛雷, 黄鑫, 王媛媛. 2010. 青海、甘肃与宁夏地区未来大地震预测分析[J]. *地球物理学进展*, **25**(4): 1168–1174.
- Qin S Q, Xue L, Huang X, Wang Y Y. 2010. Prediction of stronger earthquakes in the Qinghai, Gansu and Ningxia regions[J]. *Progress in Geophysics*, **25**(4): 1168–1174 (in Chinese).
- 师海阔, 朱新运, 贺永忠, 张立恒. 2011. 利用 Sato 模型对宁夏及邻区尾波 Q 值的研究[J]. *地震*, **31**(1): 118–126.
- Shi H K, Zhu X Y, He Y Z, Zhang L H. 2011. Q values of seismic coda in Ningxia and adjacent regions based on Sato model[J]. *Earthquake*, **31**(1): 118–126 (in Chinese).
- 师海阔, 曾宪伟, 张立恒, 贺永忠. 2016. 利用 Aki 模型对宁夏及邻区尾波 Q 值分布特征的研究[J]. *地震工程学报*, **38**(1): 51–57.
- Shi H K, Zeng X W, Zhang L H, He Y Z. 2016. Distribution characteristics of Q value of seismic coda in Ningxia and neighboring areas based on Aki model[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **38**(1): 51–57 (in Chinese).
- 向宏发, 虢顺民, 张秉良, 张晚霞, 池田安隆, 何宏林. 1998. 六盘山东麓活动逆断裂构造带晚第四纪以来的活动特征[J]. *地震地质*, **20**(4): 321–327.
- Xiang H F, Guo S M, Zhang B L, Zhang W X, Ikeda Y, He H L. 1998. Active features of the eastern Liupanshan piedmont reverse fault zone since Late Quaternary[J]. *Seismology and Geology*, **20**(4): 321–327 (in Chinese).
- 张国民, 傅征祥, 王晓青, 刘桂萍. 2006. 确定全国地震重点监视防御区的研究[J]. *中国地震*, **22**(3): 209–221.
- Zhang G M, Fu Z X, Wang X Q, Liu G P. 2006. Study on determination of the national significant seismic monitoring and protection regions[J]. *Earthquake Research in China*, **22**(3): 209–221 (in Chinese).
- 张进, 马宗晋, 任文军, 雷永良. 2007. 滑塌堆积在逆冲构造中的作用: 以宁夏牛首山中奥陶统米钵山组为例[J]. *地学前沿*, **14**(4): 85–95.

- Zhang J, Ma Z J, Ren W J, Lei Y L. 2007. The role of olistostrome in thrusting: A case study from the Miboshan Formation of Middle Ordovician in the Niushou mountain, Ningxia[J]. *Earth Science Frontiers*, **14**(4): 85–95 (in Chinese).
- 张致伟, 周龙泉, 程万正, 阮祥, 梁明剑. 2015. 芦山 M_w 6.6 地震序列的震源机制及震源区应力场[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, **40**(10): 1710–1722.
- Zhang Z W, Zhou L Q, Cheng W Z, Ruan X, Liang M J. 2015. Focal mechanism solutions of Lushan M_w 6.6 earthquake sequence and stress field for aftershock zone[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, **40**(10): 1710–1722 (in Chinese).
- 赵卫明, 刘秀景, 马禾青. 2002. 宁夏及邻区尾波 Q 值分布特征[J]. *华南地震*, **22**(1): 23–27.
- Zhao W M, Liu X J, Ma H Q. 2002. The distributing characters of coda wave Q value in Ningxia and its adjacent region[J]. *South China Journal of Seismology*, **22**(1): 23–27 (in Chinese).
- 朱新运. 2016. 华北盆地 Lg 波衰减及台站场地响应特征[J]. *地球科学*, **41**(12): 2109–2117.
- Zhu X Y. 2016. Characteristics of Lg wave attenuation and site response in North China basin[J]. *Earth Science*, **41**(12): 2109–2117 (in Chinese).
- 朱新运, 陈运泰. 2007. 用 Lg 波资料反演场地效应与地震波衰减参数[J]. *地震学报*, **29**(6): 569–580.
- Zhu X Y, Chen Y T. 2007. An inversion of site response and attenuation using Lg waveform[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(6): 569–580 (in Chinese).
- Aki K. 1969. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered wave[J]. *J Geophys Res*, **74**(2): 615–631.
- Aki K, Chouet B. 1975. Origin of coda waves: Source, attenuation, and scattering effects[J]. *J Geophys Res*, **80**(23): 3322–3342.
- Aleqabi G I, Wyssession M E. 2006. Q_{Lg} distribution in the Basin and Range Province of the western United States[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **96**(1): 348–354.
- Benz H M, Frankel A, Boore D M. 1997. Regional Lg attenuation for the continental United States[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **87**(3): 606–619.
- Borman P. 2002. *New Manual of Seismological Observatory Practice*[M]. Potsdam: German Research Centre for Geosciences: 1–20.
- Campillo M, Plantet J, Bouchon M. 1985. Frequency-dependent attenuation in the crust beneath central France from Lg waves: Data analysis and numerical modeling[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **75**(5): 1395–1411.
- Chun K Y, West G F, Kokoski R J, Samson C. 1987. A novel technique for measuring Lg attenuation: Results from eastern Canada between 1 to 10 Hz[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **77**(2): 398–419.
- Chun K Y, Wu Y, Henderson G A. 2009. Lg attenuation near the North Korean border with China, Part I: Model development from regional earthquake sources[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **99**(5): 3021–3029.
- Domínguez T, Rebollar C J. 1997. Regional variations of seismic attenuation from coda and Lg waves in northern Baja California[J]. *J Geophys Res*, **102**(B7): 15259–15268.
- Domínguez T, Rebollar C J, Castro R R. 1997. Regional variations of seismic attenuation of Lg waves in southern Mexico[J]. *J Geophys Res*, **102**(B12): 27501–27509.
- Erickson D, McNamara D E, Benz H M. 2004. Frequency-dependent Lg Q within the continental United States[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **94**(5): 1630–1643.
- Fan G W, Lay T. 2002. Characteristics of Lg attenuation in the Tibetan Plateau[J]. *J Geophys Res*, **107**(B10): 2256.
- Fan G W, Lay T. 2003a. Strong Lg wave attenuation in the northern and eastern Tibetan Plateau measured by a two-station/two-event stacking method[J]. *Geophys Res Lett*, **30**(10): 1530.
- Fan G W, Lay T. 2003b. Strong Lg attenuation in the Tibetan Plateau[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(5): 2264–2272.
- Gao L S, Lee L C, Biswas N N, Aki K. 1983a. Comparison of the effects between single and multiple scattering on coda waves for local earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **73**(2): 377–389.
- Gao L S, Biswas N N, Lee L C, Aki K. 1983b. Effects of multiple scattering on coda waves in three-dimensional medium[J]. *Pure Appl Geophys*, **121**(1): 3–15.
- Hasegawa H S. 1985. Attenuation of Lg waves in the Canadian shield[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **75**(6): 1569–1582.
- Lachet D, Hatzfeld C, Bard P Y, Theodulis N, Papaioannou C, Savvaidis A. 1996. Site effects and microzonation in the city of

- Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(6): 1692–1703.
- McNamara D E, Owens T J, Walter W R. 1996. Propagation characteristics of Lg across the Tibetan Plateau[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(2): 457–469.
- Mitra S, Priestley K, Gaur V K, Rai S. 2006. Frequency-dependent Lg attenuation in the Indian platform[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **96**(6): 2449–2456.
- Murphy J R, Bennett T J. 1982. A discrimination analysis of short-period regional seismic data recorded at Tonto Forest observatory[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **72**(4): 1351–1366.
- Parolai S, Bindi D, Augliera P. 2000. Application of the generalized inversion technique (GIT) to a microzonation study: Numerical simulations and comparison with different site-estimation techniques[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(2): 286–297.
- Parolai S, Orunbaev S, Bindi D, Strollo A, Usupaev S, Picozzi M, DiGiacomo D, Augliera P, Alema E D, Milkereit C, Moldobekov B, Zschau J. 2010. Site effects assessment in Bishkek (Kyrgyzstan) using earthquake and noise recording data[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **100**(6): 3068–3082.
- Paul A, Jongmans D, Campillo M, Malin P, Baumont D. 1996. Amplitudes of regional seismic phases in relation to crustal structure of the Sierra Nevada, California[J]. *J Geophys Res*, **101**(B11): 25243–25254.
- Sato H. 1977. Energy propagation including scattering effects single isotropic scattering approximation[J]. *J Phys Earth*, **25**(1): 27–41.
- Shi J H, Kim W Y, Richards P G. 1996. Variability of crustal attenuation in the northeastern United States from Lg waves[J]. *J Geophys Res*, **101**(B11): 25231–25242.
- Sylvette B C, Cécile C, Pierre-Yves B, Fabrice C, Peter M, Jozef K, Föh D. 2006. H/V ratio: A tool for site effects evaluation, results from 1-D noise simulations[J]. *Geophys J Int*, **167**(2): 827–837.
- Zhang J J, Lay T, Zaslav J, Walter W R. 2002. Source effects on regional seismic discriminant measurements[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(8): 2926–2945.
- Zhang P Z, Burchfiel B C, Molnar P, Zhang W Q, Jiao D C, Deng Q D, Wang Y P, Royden L, Song F M. 1991. Amount and style of late Cenozoic deformation in the Liupanshan area, Ningxia Autonomous Region, China[J]. *Tectonics*, **10**(6): 1111–1129.
- Zhu X Y, Chen Y T. 2012. An inversion of Lg-wave attenuation and site response in the North China region[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **102**(6): 2600–2610.
- Zhu X Y. 2014. An inversion of Lg-wave attenuation and site response from seismic spectral ratios in the eastern China region[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **104**(3): 1389–1399.