

# 利用大容量气枪震源资料研究 北天山地区介质衰减特征<sup>\*</sup>

苏金波<sup>1,2</sup>, 王宝善<sup>3</sup>, 王海涛<sup>2</sup>, 王 琮<sup>2</sup>, 冀战波<sup>1,3</sup>

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011;  
3. 中国地震局地震观测与地球物理成像重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 利用人工震源(大容量气枪)数据资料对北天山地区的气枪信号振幅随距离衰减关系和介质的衰减特征进行了研究。选取北天山地区新疆数字地震台网的8个固定台站记录到的气枪震源信号, 计算气枪主频2~6 Hz之间的叠加后信号的振幅谱值的均方根, 用均方根值代表气枪信号传播到该台站处的振幅值, 并对得到的均方根值进行拟合, 得出当频率为3.8 Hz时研究区域P波和S波品质因子分别为 $Q_p = (464 \pm 70)$ ,  $Q_s = (653 \pm 46)$ 。用同样方法计算气枪震源附近发生的一个天然地震的信号, 得出当频率为4.2 Hz时 $Q_p = (226 \pm 40)$ ,  $Q_s = (484 \pm 34)$ 。以上测量结果与前人利用不同范围天然地震得到的结果类似, 表明人工震源资料可以用于介质衰减特征研究, 相关研究为长时间监测地球介质衰减特征随时间变化提供了基础。

**关键词:** 人工震源; 北天山地区; 振幅衰减;  $Q$ 值

**中图分类号:** P313.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2015)04-0598-08

## 0 引言

地震波在地球介质中的衰减携带着地震震源性质和地球深部构造的物理信息(林怀存, 李永红, 2001)。研究地震波在地球介质中的衰减可以为研究地球内部的精细结构、物质组成、物理化学状态等提供十分重要的依据, 其结果可用于能源勘探、地震预报等方面。因此, 对地震波衰减的研究一直受到地球物理工作者的高度重视(刘建华等, 2004)。

地震的发生往往伴随着地球介质内部应力的积累和释放, 我们可以根据监测地下介质应力的变化对地震孕育和发生进行动态监测。目前, 被普遍认可的方法是利用地震波测量地下介质的波速随时间的变化(如 Niu *et al.*, 2008)。但是, 实验室研究结果表明, 同地震波速相比, 衰减对岩石物理状态变化的反应更为灵敏, 我们可以通过监测地震波在地下介质中的衰减来对地震的孕育

和发生进行监测和研究(刘斌等, 1998)。

目前, 对地震波衰减的研究主要局限在天然地震和小尺度的岩石物理实验, 其中利用天然地震波研究地壳 $Q$ 值的方法主要有单台—单源, 多台—单源, 多台—多源等方法, 利用的地震波资料包括自由震荡、面波、体波、Lg波、尾波、地震烈度资料等(赵翠萍等, 2004; 周连庆等, 2008)。利用地震等天然震源对地下介质进行监测受到震源时空分布不均匀的限制(王宝善等, 2011)。利用人工震源对地球介质 $Q$ 值的研究较少, 主要是因为一般的人工震源能量小、频率高, 传播距离短(徐荟等, 2015), 无法对较大尺度的区域进行 $Q$ 值的研究。

最近发展起来的陆地水库大容量气枪震源具有频率低, 重复性好, 信号传播距离远等优点, 是进行地下介质连续监测的理想震源(陈颢等, 2007; Wang *et al.*, 2012; 罗桂纯等, 2007; 杨微等, 2013; 王彬等, 2015)。本文通过分析大容量气枪震源激发的信号研究北天山地区介质的衰减

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-05-13.

**基金项目:** 2015年行业专项(地震行业专项20150800)、国家自然科学基金——呼图壁储气田充放气引起地下应力变化的地震学观测(41474051)和自治区科研机构创新发展专项基金(2013016)联合资助。

特性, 以期为该地区的物性特征及其演化研究提供重要信息。

## 1 试验系统与数据

为连续监测北天山地区地下介质变化, 2013年5月建成了一个以大容量气枪为核心的“新疆主动震源野外科学观测研究站”, 这是我国第一座人工水体的大容量气枪发射台站。气枪发射台定址于乌鲁木齐西北约80 km、北天山北麓的呼图壁县境内的古河滩荒地, 激发池为上直径100 m、下直径20 m、深度18 m的圆台形人工水体。发射台配备6条单枪容量为2 000 in<sup>3</sup>的Bolt 1500LL型气枪。

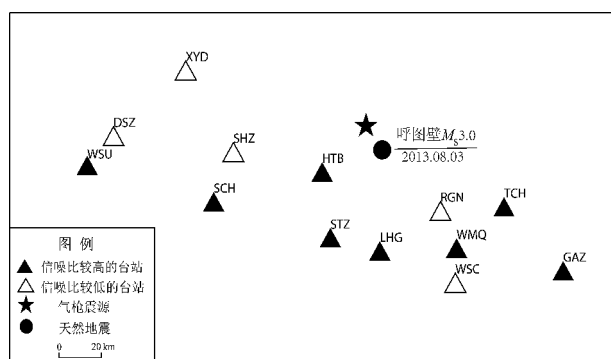


图1 气枪震源位置及周边台站分布

Fig. 1 Location of the airguns source and seismic stations in the surrounding area

新疆呼图壁气枪震源在2013年6~12月共进行600次有效激发, 激发的地震波信号被新疆数字地震台网记录。激发期间气枪沉放深度为10 m, 工作压力为15 MPa, 6条枪同时一次激发释放的能量与一次 $M_L 0.9$ 天然地震释放的能量相当(杨微等, 2013)。由于气枪震源的重复性极高, 可以对同一台站接收到的不同次激发的气枪信号进行叠加来提高信噪比(王宝善等, 2013)。图2显示600次激发信号的叠加结果, 带通滤波范围2~6 Hz, 图中, 红色部分信号波形为北天山地区8个固定台站记录到的气枪震源信号。从图中可以看出最远的固定地震台(380 km)依然可以记录到很强的气枪信号, 且该地区P波和S波的平均视速度分别为6 km/s和3.5 km/s。

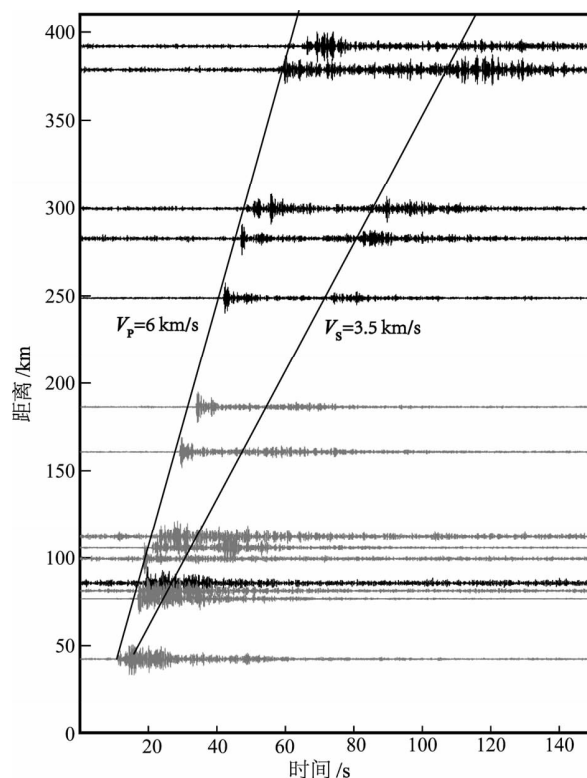


图2 固定台站记录到的气枪激发的地震波(垂直向分量)

Fig. 2 Seismic wave generated by airgun source recorded by permanent station (vertical component)

## 2 气枪信号衰减

为了研究气枪信号在北天山地区振幅与传播距离衰减关系, 笔者对该地区新疆数字地震台网的固定台站接收到的气枪信号进行叠加, 并对叠加后信号的信噪比进行筛选, 最终选取了沿着北天山分布的8个信噪比较高的固定台站的波形数据(图1)。选取台站都是基岩地基, 采用速度记录观测所使用的EDAS-24型数字采集器, 地震计为BBVS-60型。系统频响特性在0.1~20 Hz之间, 速度响应基本平坦, 采样率为100 Hz。

首先, 对选取的8个台站记录到的气枪信号进行了600次叠加, 提高信噪比。通过叠加, 气枪信号可以被比较清楚地识别出来(图2红色部分)。然后去除地震信号中的仪器响应, 把地震仪记录到的信号还原成代表地表运动速度的信息。为了更加清楚地观察到气枪信号, 对叠加后信号进行

了一次 1~20 Hz 的宽频带滤波, 去除高频噪声的影响, 手动拾取了 P 波和 S 波到时。

对于滤波后的波形, 我们分别截取了 P 波到

时前 2 s 和后 8 s 进行深入分析。对于截取波形 (图 3a) 进行傅里叶变换, 将信号变换至频率域中, 得到气枪信号的频率—振幅谱 (图 3b)。

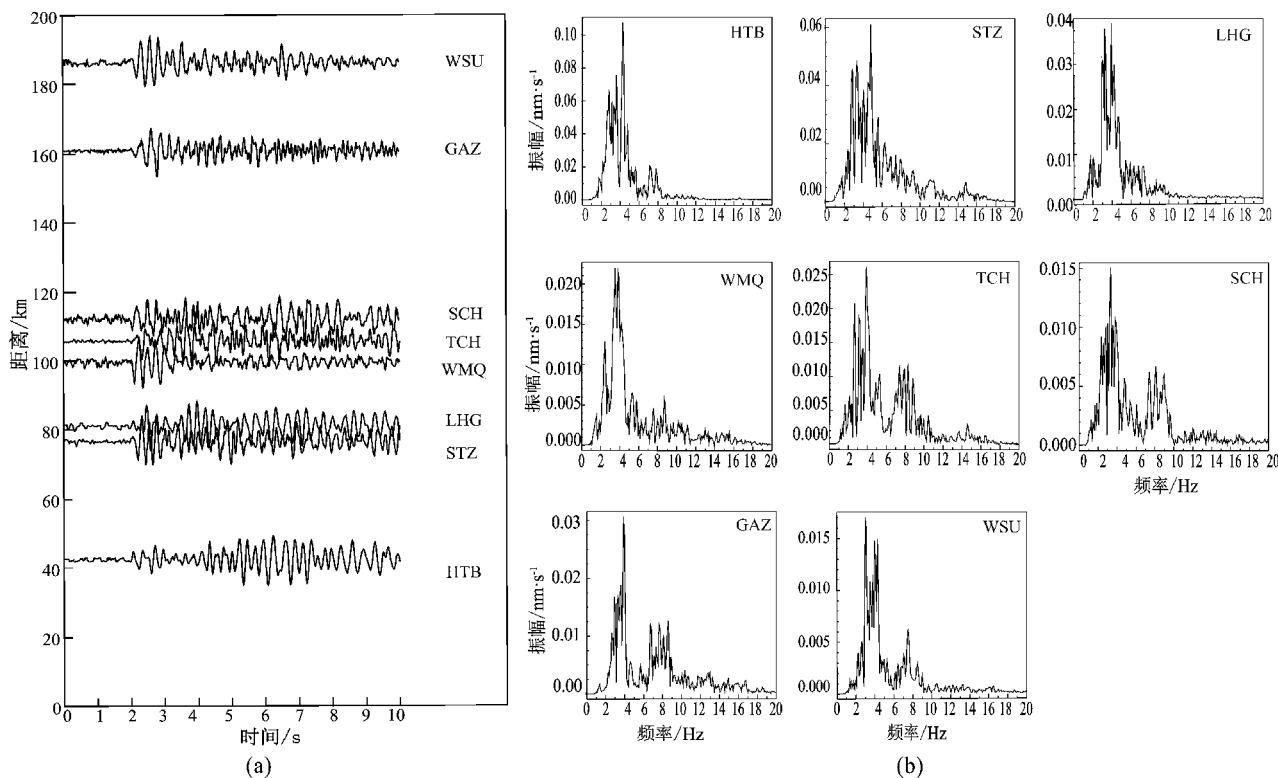


图 3 固定台站记录到的研究区域气枪震源激发信号叠加后的 P 波震相 (a) 和对应的频率振幅谱 (b)

Fig. 3 Stacked P wave signal generated by airguns recorded by permanent station in north Tianshan (a) and the corresponding amplitude spectra (b)

从图 3b 可以看出, 气枪信号主要频率集中在 2~6 Hz, 因此计算 2~6 Hz 之间所有谱值的均方根, 用这个均方根值代表 P 波传播到该台站处时的振幅值 (Yamaoka *et al.*, 2014), 进而可以得到气枪震源激发的 P 波信号振幅随距离的衰减关系 (图 7)。

从图 2 可以发现, 呼图壁气枪震源激发的 S 波普遍不强, 但还是可以从图上比较清晰的分辨出来, 使用上文同样的方法, 我们对 S 波也进行了振幅谱的计算, 分别截取了 S 波到时前 0 s 和后 20 s 进行深入分析, 结果如图 4 所示。

从图 4b 可以发现, 气枪震源激发的 S 波信号主要频率依然在 2~6 Hz, 利用与上文同样的方法, 可以得到气枪震源激发的 S 波信号振幅随距离的衰减关系 (图 8)。

2013 年 8 月 3 日, 在距离气枪震源 10 km 左

右的呼图壁县与昌吉市交界处 (44.3°N, 87.1°E) 发生了一次  $M_s 3.0$  地震, 震源深度为 8 km (图 1)。我们选取此次地震波形研究计算介质衰减, 并与气枪震源获得的衰减特征进行对比。图 5、6 表明, 天然地震信号的频谱明显比气枪震源宽。为了与气枪信号的衰减关系进行对比, 我们同样计算出频率振幅谱上 2~6 Hz 谱值的均方根, 作为地震波传播到该台站时的振幅值 (Yamaoka *et al.*, 2014), 并得到天然地震 P 波和 S 波振幅随距离衰减关系 (图 7、8)。

通过对比天然地震和气枪震源的 P 波和 S 波振幅随距离衰减可以发现: (1) 二者的衰减关系很类似, 大体都呈现指数衰减; (2) 从振幅归一化后的结果对比可以发现, 气枪信号的 P 波和 S 波振幅随距离的衰减都要比天然地震慢。

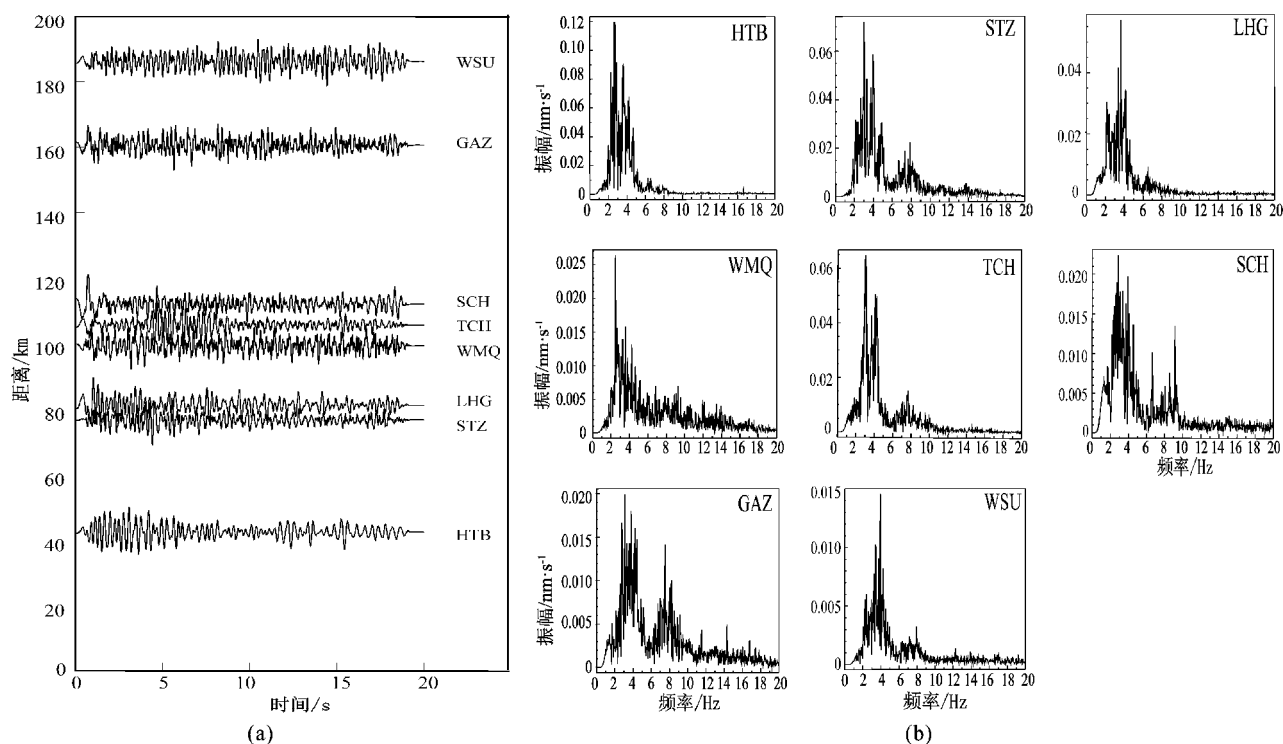


图4 固定台站记录到的研究区域气枪震源激发信号叠加后的S波震相(a)和对应的频率振幅谱(b)

Fig. 4 Stacked S wave signal generated by airguns recorded by permanent station in north Tianshan (a) and the corresponding amplitude spectra (b)

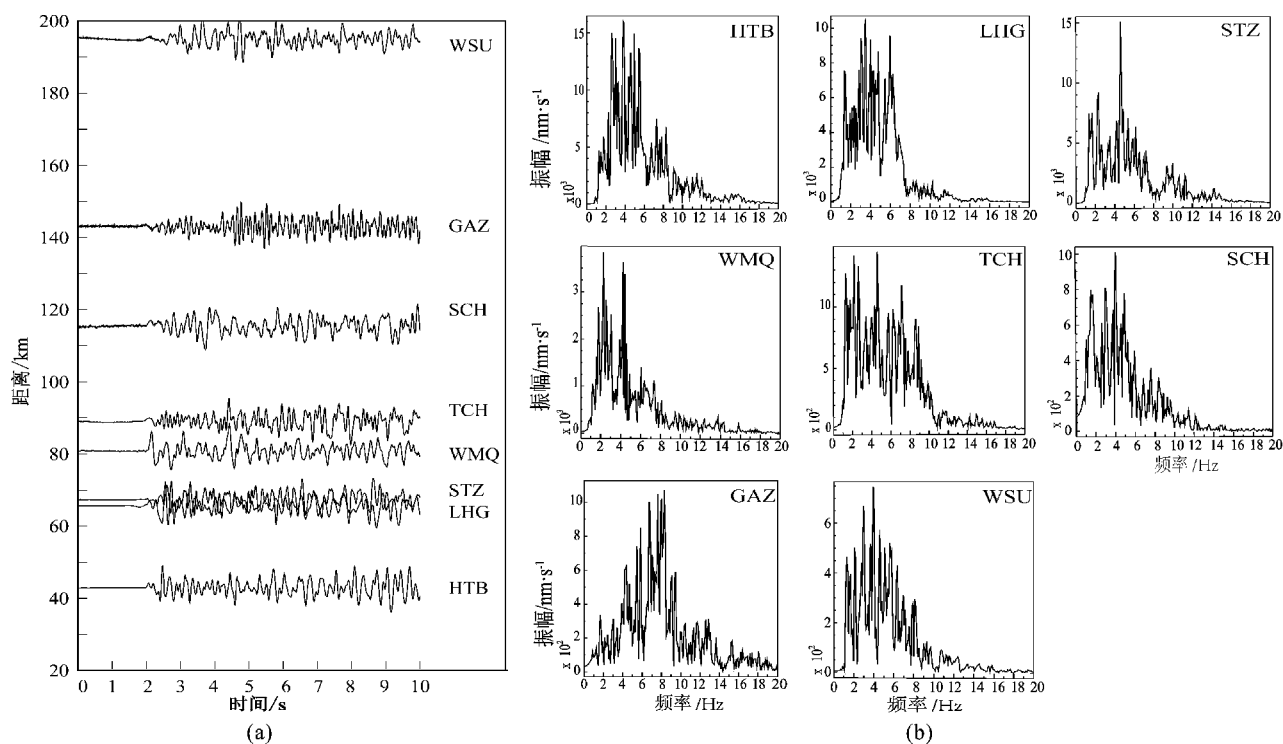


图5 固定台站记录到的研究区域天然地震信号P波震相图(a)及对应的频率振幅谱(b)

Fig. 5 P wave signal generated by airguns recorded by permanent station in north Tianshan (a) and the corresponding amplitude spectra (b)

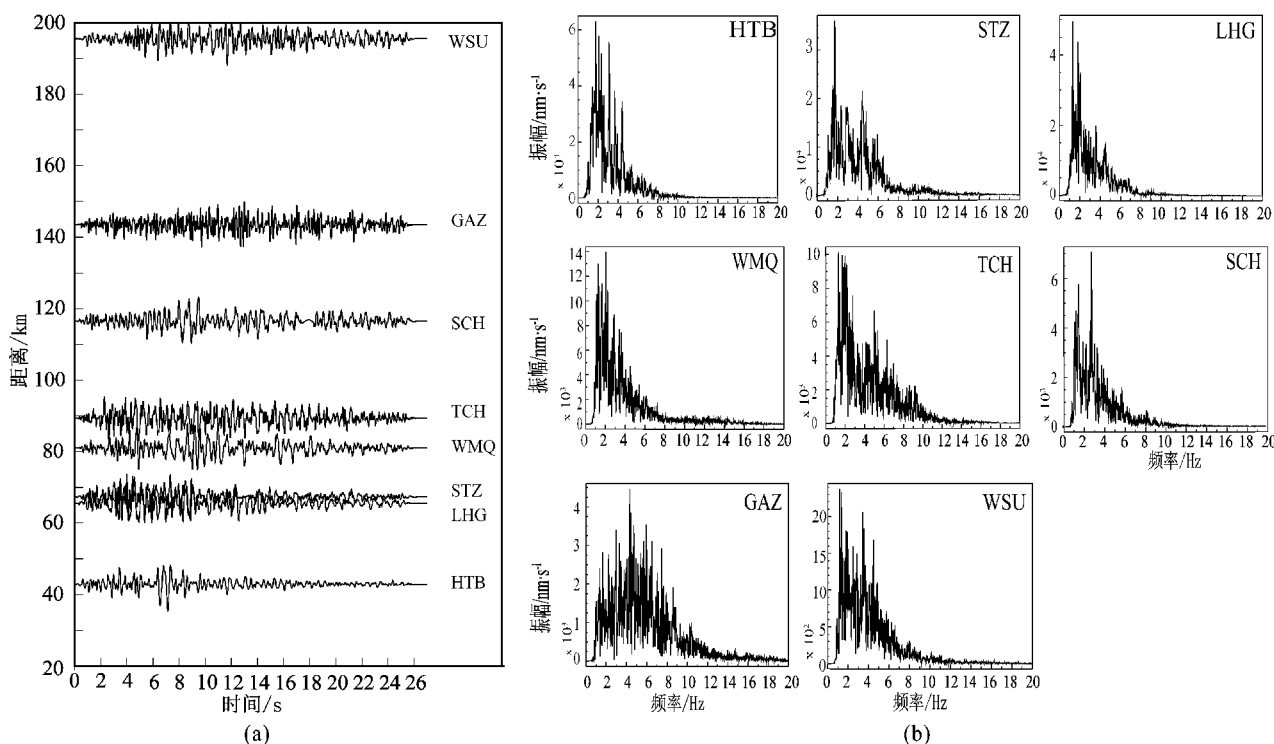


图6 固定台站记录到的研究区域天然地震信号S波震相(a)和对应的频率振幅谱(b)

Fig. 6 S wave signal generated by airguns recorded by permanent station in north Tianshan (a) and the corresponding amplitude spectra (b)

### 3 振幅随距离衰减模型

地震信号振幅随传播距离的衰减跟很多种因素有关,除了和介质的非完全弹性和不均匀性有关外,还和地震波的几何扩散有关。根据 Richards 和 Aki (1980) 对地震波衰减的研究,体波随距离衰减的关系为

$$A = a \frac{\exp(-\frac{\pi f}{Q\beta} x)}{x} \quad (1)$$

式中,  $x$  表示震中距,  $a$  表示震源处的振幅值,  $1/x$  表示由几何扩散造成的体波振幅随距离的衰减,  $\exp(-\frac{\pi f}{Q\beta} x)$  表示由于体波在介质中传播的能量损耗造成的体波振幅衰减,由品质因子  $Q$ 、地震波频率  $f$  和体波传播速度  $\beta$  来确定的 (Battaglia, Aki, 2004)。

由于计算体波传播至特定台站引起的振幅值时(式(1)  $A$  值),是用2~6 Hz之间振幅谱值的均方根来代表的,所以这个振幅值对应的频率是

一个中间频率,可以利用加权平均的方法来得出这个振幅值对应的频率,以振幅谱值作为权重,对频率进行加权平均:

$$f = \frac{\sum f_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad (2)$$

得出气枪震源和天然地震的体波传播至特定台站引起的振幅值对应的加权平均频率分别为 3.8 Hz 和 4.2 Hz。

利用式(1)作为模型和式(2)计算出的加权平均频率,取P波的传播速度  $\beta = 6$  km/s, S波的传播速度  $\beta = 3.5$  km/s (图2),可对体波振幅衰减关系进行拟合。由于这里我们更关注的是  $\exp(-\frac{\pi f}{Q\beta} x)$ ,即由于地震波在介质中传播的损耗造成的地震波信号随距离的衰减,所以可以直接对图7中的天然地震和气枪震源P波信号的归一化振幅值随传播距离衰减关系进行拟合,可以得出,利用气枪震源激发的P波振幅随距离衰减关系拟合出  $Q_p = (464 \pm 70)$ ,天然地震激发的P波随距离衰减情况拟合出  $Q_p = (226 \pm 40)$  ( $\pm$ 后的值为拟合的标准误差)。

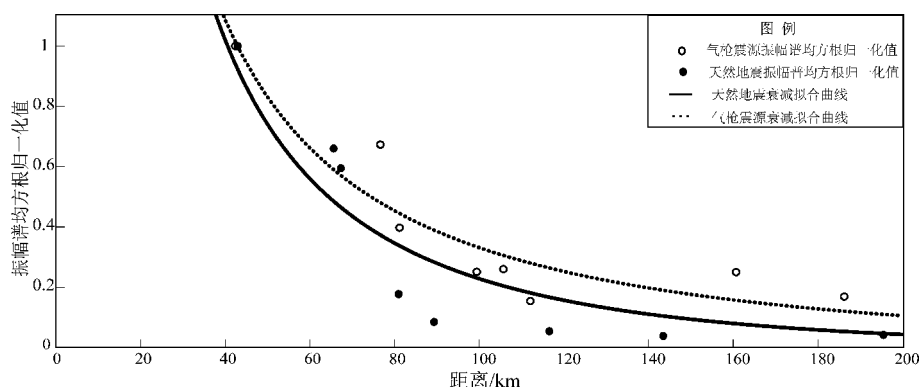


图7 气枪震源与天然地震P波信号归一化振幅衰减

Fig. 7 The normalized amplitude attenuation of P waves of airgun source and earthquake

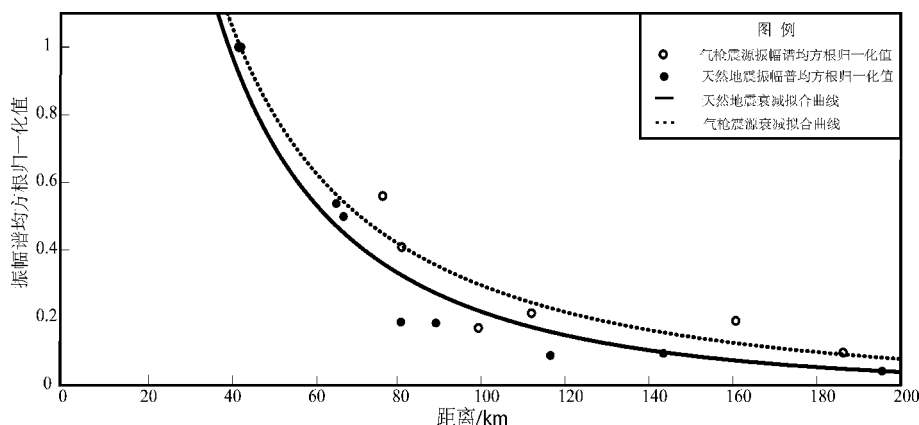


图8 气枪震源与天然地震S波信号归一化振幅衰减

Fig. 8 The normalized amplitude attenuation of S waves of airgun source and earthquake

用同样的方法, 根据式 (1), 可以直接对图 8 中的天然地震和气枪震源 S 波信号的归一化振幅随传播距离衰减关系进行拟合, 得到气枪震源和天然地震拟合出的  $Q_s$  分别为  $(653 \pm 46)$  和  $(484 \pm 34)$ 。

#### 4 讨论与结论

姜慧等 (2007) 利用中小地震的观测资料反演的北天山地区  $Q_s = 278f^{0.346}$ , 这里取  $f = 3.8$  Hz 和  $f = 4.2$  Hz, 得到对应的  $Q_s$  值分别为 441 和 457, 这个结果和本文得到的利用天然地震拟合的  $Q_s$  值比较一致, 说明本文提到的方法在该地区的  $Q$  值拟合的运算中是可行的。

从上文得出的结论我们可以发现: (1) 无论是气枪震源还是天然地震, 相同频率 P 波振幅的衰减都要比 S 波的快; (2) 相同频率的气枪震源

拟合得出的  $Q_p$  和  $Q_s$  均比天然地震得出的值高, 这可能是由于区域结构 (Cappenter, Stanford, 1985) 和二者震源特性造成的。

影响地震波振幅衰减计算结果的因素有很多种, 主要有震源处辐射花样, 传播过程中的散射、几何扩散、仪器的不稳定性, 介质的横向和径向的不均匀性, 地球的自传和椭圆率等 (付昌洪, 1985)。本文在拟合气枪震源和天然地震体波信号衰减得出研究区域品质因子时, 考虑到几何扩散和仪器响应对品质因子造成的影响。所以造成气枪震源和天然地震信号拟合得到的研究区域品质因子存在差别的主要原因, 很可能是震源辐射花样不同造成的。气枪震源可以看作是一个比较均匀的膨胀源, 而天然地震是一个位错源, 所以二者激发出来的体波性质会有一些不同。呼图壁气枪震源激发出来的 S 波不强, 但 P 波很强, 这与天然地震的震源特性差别较大。

从图 7 和图 8 我们可以看出气枪震源激发的体波在传播 100 km 以后, 振幅出现了一个增大的现象, 这可能是由于气枪震源是一个表面源, 在传播至近场台站时, 体波射线路径经过浅表沉积层的部分较多, 衰减较大, 而传播至远场台站时, 射线路径经过浅表沉积层的部分相对变少, 经过深层基岩的部分较多, 振幅的衰减可能比一些近场的台小, 可能造成一些振幅增大的现象。而天然地震有一定震源深度 (上文的  $M_L 3.0$  天然地震震源深度为 8 km), 体波的射线路径相比气枪震源存在着一定差别, 从图上未发现明显的振幅变大现象。同时由于选取波列相对较长, 不同震中距上可能会出现不同的震相。以上情况对我们的拟合结果均可能造成了一定影响。

想要提高拟合精度, 得出更精确的  $Q$  值, 就必须要求研究区域有较为密集的台站。而本文研究区域内的台站相对稀疏, 这对拟合精度造成了很大的影响。希望以后该区域的台网更加密集, 不但有利于进行对地震波衰减的研究, 更有利于提高该地区对地震的监测能力。

气枪震源和天然地震一样, 都具有丰富的低频成分, 虽然二者在震源特性上有一些差别, 但是, 从根据二者振幅衰减情况拟合出的  $Q_p$  和  $Q_s$  上看, 二者的传播规律十分相似。所以, 我们可以利用气枪震源来进行一些以前只能靠天然地震作为震源来研究的内容。气枪震源拥有精确的发震位置和发震时刻, 而且环保高效, 利用这些优势, 我们还可以对一些天然地震研究方法进行验证和改进。

新疆维吾尔自治区地震局监测中心的陈向军高级工程师和唐明帅高级工程师为作者提供数据支持, 中国地震局地震观测与地球物理成像重点实验室的王芳博士和胡久鹏博士在论文写作和程序中给了作者很大的帮助, 在此一并表示感谢。

#### 参考文献:

陈颢, 张先康, 丘学林, 等. 2007. 陆地人工激发地震波的一种新方法 [J]. 科学通报, 52(11): 1317 - 1321.  
付昌洪. 1985. 近震 P 波的衰减研究 [J]. 地震地磁观测与研究,

(6): 16 - 22.

- 姜慧, 高孟潭, 俞言祥, 等. 2007. 北天山地区 S 波非弹性衰减和场地效应研究 [J]. 地震学报, 29(2): 181 - 186.  
林怀存, 李永红. 2001. 山东地区地震波衰减特点及其应用 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), (4): 411 - 413.  
刘斌, Kern H., Popp T. . 1998. 不同围压下孔隙度不同的干燥及水饱和和岩样中的纵横波速度及衰减 [J]. 地球物理学报, 41(4): 537 - 546.  
刘建华, 刘福田, 胥颐. 2004. 远震 P 波衰减因子的测量与 Q 成像方法 [J]. 地球物理学进展, 19(2): 304 - 310.  
罗桂纯, 葛洪魁, 王宝善, 等. 2007. 气枪震源激发模式及应用 [J]. 中国地震, 23(3): 225 - 232.  
王宝善, 王伟涛, 葛洪魁, 等. 2011. 人工震源地下介质变化动态监测 [J]. 地球科学进展, 26(3): 249 - 256.  
王宝善, 杨微, 王伟涛, 等. 2013. 利用大容量气枪监测北天山地壳介质变化 [A] // 中国地球物理 2013——第十二分会场论文集 [C], 408 - 409.  
王彬, 吴国华, 苏有锦, 等. 2015. 宾川地震信号发射台的选址、建设及初步观测结果 [J]. 地震研究, 38(1): 1 - 6.  
徐荟, 刘学军, 王彬, 等. 2015. 利用主动震源直达波互相关时延检测技术监测小江断裂带浅层地震波波速变化 [J]. 地震研究, 38(1): 7 - 15.  
杨微, 王宝善, 葛洪魁, 等. 2013. 大容量气枪震源主动探测技术系统及试验研究 [J]. 中国地震, 29(4): 339 - 410.  
赵翠萍, 张智强, 夏爱国, 等. 2004. 利用数字地震波资料研究新疆天山中东段地区的介质衰减特征 [J]. 防灾减灾工程学报, 24(3): 300 - 305.  
周连庆, 赵翠萍, 修济刚, 等. 2008. 利用天然地震研究地壳  $Q$  值的方法和进展 [J]. 国际地震动态, (2): 1 - 11.  
Aki, Richards P. G. . 1980. Quantitative seismology: theory and methods [M]. Freeman W. H. & Co Ltd, 425 - 442.  
Battaglia J., Aki K. . 2004. Location of seismic events and eruptive fissures on the Piton de la Fournaise volcano using seismic amplitudes [J]. Journal of Geophysical Research, 108(B8): 223 - 241.  
Carpenter P. J., Sanford A. R. . 1985. Apparent  $Q$  for upper crustal rocks of the Central Rio Grande Rift [J]. Journal of Geophysical Research, 90(B10): 8661 - 8674.  
Niu F., Silver P. G., Daley T. M., *et al.* . 2008. Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site [J]. Nature, 454: 204 - 208.  
Wang B., Ge H., Yang W., *et al.* . 2012. Transmitting seismic station monitors fault zone at depth [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 93(5): 49 - 50.  
Yamaoka K., Miyamachi H., Watanabe T., *et al.* . 2014. Active monitoring at an active volcano: amplitude - distance dependence of ACROSS at Sakurajima Volcano, Japan [J]. Earth Planets & Space, 66(1): 267 - 277.

## Research on Characteristic of Seismic Attenuation in the Northern Tianshan Area using Seismic Signal from Airgun Source

SU Jin-bo<sup>1,2</sup>, WANG Bao-shan<sup>3</sup>, WANG Hai-tao<sup>2</sup>, WANG Qiong<sup>2</sup>, JI Zhan-bo<sup>3</sup>

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

(2. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

(3. Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, CEA, Beijing 100081, China)

### Abstract

Using the artificial seismic source (airguns) data, we studied the attenuation relation of the amplitude of airguns signal with distance and estimated the attenuation characteristics of the medium in the northern Tianshan area. We chose the airguns signals which were recorded by 8 fixed stations in Xinjiang Digital Seismic Network in the northern Tianshan area, and calculated the RMS (root mean square) of amplitude spectrum of the signal after the stacking of the signals within the frequency 2 ~ 6 Hz of airguns. Taking the RMS value as the amplitude which was formed when the airgun signal propagated to each station, we fitted these RMS values with attenuation equation, and obtained that when the frequency is 3.8 Hz, the quality factors of P and S waves are  $Q_p = (464 \pm 70)$  and  $Q_s = (653 \pm 46)$  in the study area. By using the same method, we also calculated seismic attenuation by using an earthquake signal occurred near the airguns source, and obtained that when the frequency is 4.2 Hz, the quality factors of P and S waves are  $Q_p = (226 \pm 40)$  and  $Q_s = (484 \pm 34)$ . The obtained results are similar to previous studies which were based on earthquake in different area. It shows that artificial seismic source can be used to study on attenuation characteristic of the medium, and the relative study could provide the foundation for monitoring the variation characteristics of geological medium attenuation with time in the long term.

**Key words:** artificial source; northern Tianshan area; amplitude attenuation;  $Q$  value