

# 河北地区地震动衰减和场地响应的研究<sup>①</sup>

赵英萍, 杨 锐, 高景春, 王 宁, 贾 炯, 李雪英, 蔡玲玲, 王莉婵

(河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

**摘要:**利用河北测震数字台网 2009 年 1 月—2015 年 5 月记录到的 169 个  $M_L \geq 2.5$  地震(含山区和平原)4 180 条波形资料, 将河北(含北京、天津)及邻近地区作为研究区域, 根据地形及地质构造将研究区域分为山区和平原两个区, 采用三段几何衰减模型, 用 Atkinson(1992)方法计算各自的  $Q$  值, 得到山区和平原的非弹性衰减  $Q$  随频率变化的关系式分别为:  $Q(f) = 474.8f^{0.3589}$ ,  $Q(f) = 294.5f^{0.5193}$ , 并与已有的结果进行对比。在此基础上, 利用 Moya(2000)方法进行震源谱和场地响应的联合反演, 得到了 93 个基岩台、58 个井下台的场地响应, 基岩台的场地响应随频率的变化较为复杂。不同类型的基岩台场地响应绝大多数无明显的一致性特征; 井下台站的场地响应随频率变化的形态基本一致, 在低频段(1~7 Hz)表现为放大作用, 在高频段(7~20 Hz)表现为衰减效应。

**关键词:** 河北地区; 地震动衰减; 场地响应;  $Q$  值

中图分类号: P315.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)增刊 2-0329-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.Supp.2.0329

## Attenuation of Ground Motion and Site Response in Hebei Region

ZHAO Ying-ping, YANG Rui, GAO Jing-chu, WANG Ning, JIA Jiong,

LI Xue-ying, CAI Ling-ling, WANG Li-chan

(Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

**Abstract:** In the paper, 4180 horizontal-component digital seismograms of 169 earthquakes recorded on 162 stations of Hebei Digital Tele-seismic Network during Jan. 2009 to May 2015 are used in the researches for the entire Hebei region and adjacent domain, the study area is divided into two areas; the mountain area and the plain area according to the terrain and geological structure, the inelastic attenuations of the two areas are studied. Following a hinged tri-linear geometrical spreading model, the  $Q$  values are calculated for each area by Atkinson's method and compared with the existed data. The frequency-dependent  $Q$  in the mountain and flat area are estimated as  $Q(f) = 474.8f^{0.3589}$  and  $Q(f) = 294.5f^{0.5193}$ . Then, the source parameters and the site responses are inverted by the Moya's method, the site responses of 93 bedrock stations and 58 underground stations are obtained. The site responses with frequency for bedrock stations are more complicated, most of the site responses of different types of bedrock stations have no obvious consistency. The site responses of the underground stations are basically consistent with the change of frequency, and the performance of the low frequency band (1 ~ 7 Hz) is enlarged, and the high frequency band (7 ~ 20 Hz) is the attenuation effect.

**Key words:** Hebei region; attenuation of ground motion; site response;  $Q$  value

① 收稿日期: 2016-06-27

基金项目: 河北省地震局地震科技星火计划面上项目(DZ20150419018, DZ20140714052)

作者简介: 赵英萍(1968-), 高级工程师, 主要从事地震编目、地震分析工作。E-mail: lifeplayer01@sina.com。

## 0 引言

地震波衰减特征和台站的场地响应是地震学研究的基础课题,也是进一步研究震源性质、震源参数日常化计算的基础参数,同时对震害评估、重大工程的抗震设防也有重要意义。Rogers等<sup>[1]</sup>采用内华达试验场核爆破记录的波谱,计算了Long Beach的场地响应,结果表明在0.2~6 s波段冲积层相对于岩石的场地放大倍数高达11倍。不少的震害调查结果也表明,大地震时松软地基上的建筑物要比坚硬地基上的建筑物破坏率高得多。河北地区地质构造非常复杂,有蔓延的山区,有覆盖着第四系沉积的广袤平原,区内有多条活动的断裂带,曾发生多次破坏性地震,如1679年9月2日三河8级地震,1976年7月28日唐山7.8级地震,1966年3月22日邢台7.2级地震,1998年1月10日张北6.2级地震等。此研究有重要的现实意义。

由于几何扩散、非弹性衰减、场地响应对地震波的影响耦合在一起,通常难以确切地得到它们的绝对量,几何衰减模型的合理确定,一定程度上减少了这种不确定因素。黄玉龙等<sup>[2]</sup>同时采用线性几何衰减模型、两段几何衰减、三段几何衰减模型对广东地区的地震观测数据进行了拟合,结果表明,三段几何衰减模型的残差最小。其后,赵翠萍等<sup>[3]</sup>、王勤彩等<sup>[4]</sup>、啜永清等<sup>[5]</sup>、兰从欣等<sup>[6]</sup>采用三段几何衰减模型分别对新疆天山中东段、华北中北部、山西地区、北京地区的观测资料进行了研究,均得到了稳定可靠的结果,他们的研究再次显示了三段几何衰减模型的合理性和适用性。

本研究选取河北数字测震台网记录到的中小地震的波形资料,运用Atkinson<sup>[7]</sup>和Moya<sup>[8]</sup>方法,研究该地区介质非弹性衰减特征和台站的场地响应。

## 1 河北地区地质构造背景及观测资料处理

### (1) 河北地区地质构造背景及台站情况

河北地区北至燕山延伸至阴山南麓,西至太行山;中南部属华北平原,广泛分布着第四纪松散沉积物。平原区的地壳厚度为31~36 km,山区的地壳厚度为36~40 km<sup>[9]</sup>。研究区内有多条活动的断裂带,较大的断裂带有张渤断裂带、太行山东麓断裂带及唐山—磁县断裂带,地质构造非常复杂。

河北测震数字台网由168个地震台组成,其中河北省台站57个,邻省共享台站111个。由于软件限制,剔除了6个台站代码相同的台站,162个台站

的波形数据参与了资料筛选。这些台站中基岩台98个,井下台64个(表1列出了各台站仪器型号和台基岩性)。所有台站的观测量均为速度,使用3ESPC-60、BBVS-120、BBVS-60、FBS-3B、CMG-3ESPC等宽频带地震计及FSS-3DBH井下短周期地震计;使用24位数据采集器,型号主要为EDAS-24GN、EDAS-24IP、EDAS-C24B及CMG-DM24;所有地震仪在1~20 Hz间具有速度平坦的响应,采样率均为100 Hz。

### (2) 资料选择及预处理

前人研究表明:构造稳定地区的Q值较大,构造活动强烈的地区Q值较小;相应地,基岩区的场地响应高,沉积层的场地响应低。为了使研究结果更客观、更接近实际,本研究根据地形及地质构造将研究区域分为山区和平原两个区,分别反演其Q值。

选取河北地震台网2009年1月—2015年5月记录到的河北省(含北京、天津)及省边界线外50 km内 $M_L \geq 2.5$ 地震。根据地震分布情况,剔除部分分布集中的地震,使地震射线尽可能均匀覆盖研究区域,对地震分布稀疏的区域,震级下限略有下浮,筛选出192个地震,其中山区65个,平原127个。

首先对每个地震每个台站的地震记录截取“S窗”,“S窗”的定义为从S波开始到包含大于90%的S波总能量的时间段,高景春等<sup>[10]</sup>研究发现:河北地区“S窗”的长度和S<sub>g</sub>-P<sub>g</sub>存在线性关系:

$$T_{sc} - T_{sf} = 0.6321(T_{sg} - T_{pg}) + 9.0 \quad (1)$$

式中: $T_{sc}$ 为“S窗”截止时间; $T_{sf}$ 为首个S波( $S_n$ 或 $S_g$ )到时; $T_{sg}$ 为S到时; $T_{pg}$ 为P到时。

本研究采用式(1)截取“S窗”。其次截取初至波( $P_g$ 或 $P_n$ )前5 s为噪声窗。将S窗分成若干256个采样点间隔,且相邻间隔之间有50%重合;对每一段,两端加5%的余弦边瓣,做FFT变换;对观测信号的傅里叶谱进行仪器响应和噪声校正,合成2个水平分量并除以 $2\pi f$ ( $f$ 为频率)得到水平向的位移谱,对地表台站的位移谱除以2以消除自由表面响应;按信噪比大于2筛选可用的波形。最终筛选出平原110个符合信噪比要求的地震,地震射线2 960条,平均震中距约为120 km;筛选出山区5个符合信噪比要求的地震,地震射线1 220条,平均震中距约为133 km。这些地震基本均匀覆盖2个研究区域(图1),其震源深度为5~25 km,震级范围为 $M_L 2.5 \sim 5.0$ ,震中距为5~380 km。

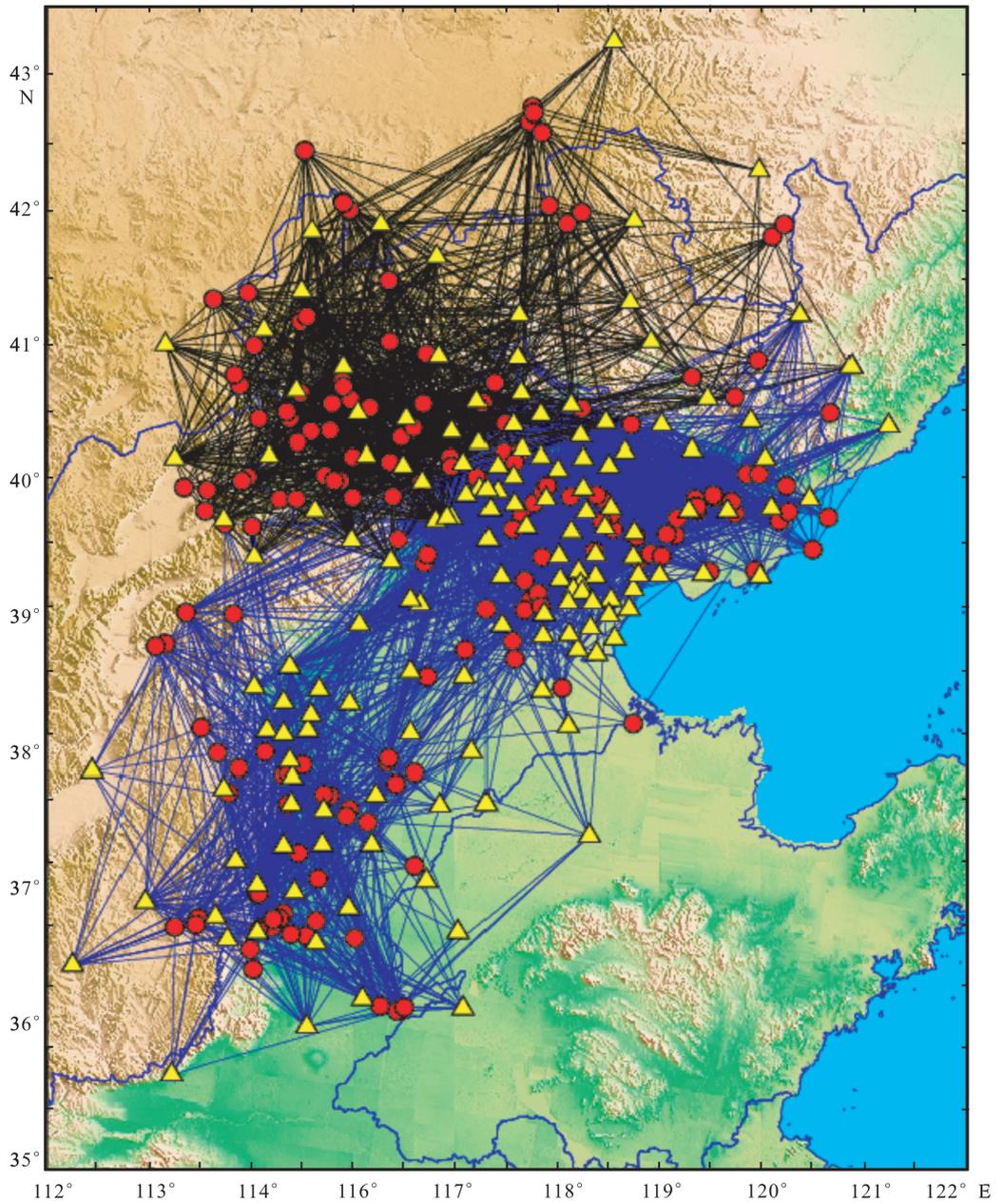


图 1 研究区台站、地震分布及 4180 条地震路径(△代表台站,○代表地震)

表 1 本研究所使用的台站的仪器型号和台基岩性

台站名	代码	台基类型	地震计	台站名	代码	台基类型	地震计
怀安	HUA	花岗岩	BBVS-60	桃林口	TLK	古生代变质岩	BBVS-60
太师屯	TST	花岗岩	BBVS-60	赤城	CHC	太古界片麻岩	BBVS-60
沙城	SHC	花岗岩	BBVS-60	阳原	YAY	震旦系白云岩	BBVS-60
马道峪	MDY	花岗岩	BBVS-60	十三陵	SSL	震旦系白云质灰岩	BBVS-120
龙泉寺	LQS	花岗岩	BBVS-60	刘斌堡	LBP	震旦系白云质灰岩	BBVS-120
昌黎	CHL	花岗岩	BBVS-60	密云	MIY	震旦系砂质灰岩	BBVS-120
涞源	LAY	花岗岩	BBVS-60	牛口峪	NKY	震旦系石灰岩	BBVS-120
南山村	NSC	花岗岩	BBVS-60	隆化	LOH	斑状混合岩	3ESPC-60
昌黎	CLI	花岗岩	BBVS-120	丰宁	FEN	变质花岗岩	BBVS-60
康保	KAB	花岗岩	3ESPC-60	西拨子	XBZ	超基性花岗岩	BBVS-120
元氏	YUS	花岗岩	BBVS-60	凌原	LYA	安山岩	BBVS-60
尚义	SHY	花岗岩	BBVS-60	大灰厂	DHC	奥陶系白质灰岩	BBVS-120

续表 1

台站名	代码	台基类型	地震计	台站名	代码	台基类型	地震计
滦县	LUX	花岗岩	BBVS-60	杨镇	YAZ	奥陶系灰岩	FSS-3DBH
集宁	JIN	花岗岩	BBVS-120	马坊	MAF	奥陶系灰岩	FSS-3DBH
宝昌	BAC	花岗岩	CTS-1	榆堡	YUF	奥陶系灰岩	FSS-3DBH
赤峰	CHF	花岗岩	CTS-1	天坛	TIT	白垩系灰岩	FSS-3DBH
经棚	JIP	花岗岩	BBVS-60	斋堂	ZHT	侏罗系火山角砾凝灰岩	BBVS-120
龙口	LOK	花岗岩	BBVS-60	法华寺	FHS	黄土	BBVS-60
承德	CHD	花岗岩片麻岩	BBVS-120	东三旗	DSQ	第四系沉积	FSS-3DBH
绥中	SUZ	花岗岩片麻岩	BBVS-60	大兴	DAX	第四系沉积	FSS-3DBH
塔寺	TAS	灰岩	BBVS-60	文安	WEA	第四系沉积	FSS-3DBH
喇叭沟	LBG	灰岩	BBVS-60	清丰	QF	第四系沉积	FSS-3DBH
沽源	GUY	灰岩	BBVS-60	深县	SHX	第四系沉积	JDF-2
遵化	ZUH	灰岩	BBVS-60	孟村	MEC	第四系沉积	FSS-3DBH
涿鹿	ZHL	灰岩	BBVS-60	阜城	FUC	第四系沉积	FSS-3DBH
北戴河	BDH	灰岩	BBVS-60	枣强	ZAQ	第四系沉积	FSS-3DBH
陡河	DOH	灰岩	BBVS-60	新河	XIH	第四系沉积	FSS-3DBH
上房山	SFS	灰岩	BBVS-60	任县	REX	第四系沉积	FSS-3DBH
完县	WAX	灰岩	BBVS-60	广宗	GAZ	第四系沉积	FSS-3DBH
黄壁庄	HBZ	灰岩	BBVS-60	临漳	LZT	第四系沉积	FSS-3DBH
周口店	ZKD	灰岩	BBVS-60	肥乡	FXT	第四系沉积	FSS-3DBH
淦县	XX	灰岩	BBVS-60	东营	DOY	第四系沉积	FSS-3DBH
焦作	JZ	灰岩	BBVS-60	海化	HAH	第四系沉积	FSS-3DBH
平顶山	PDS	灰岩	BBVS-60	成武	CHW	第四系沉积	FSS-3DBH
磁县	CXT	灰岩	3ESPC-60	聊城	LCH	第四系沉积	FSS-3DBH
井陘	JNX	灰岩	BBVS-60	商河	SHH	第四系沉积	FSS-3DBH
行唐	XIT	灰岩	BBVS-60	德州	DZH	第四系沉积	FSS-3DBH
梁山	LSH	灰岩	BBVS-120	临清	LIQ	第四系沉积	FSS-3DBH
大同	SHZ	灰岩	BBVS-120	新安镇	XAZ	第四系沉积	FSS-3DBH
昔阳	XIY	灰岩	CMG-3ESPC	河北屯	HBT	第四系沉积	FSS-3DBH
宽城	KUC	夹石英灰岩	BBVS-60	尔王庄	EWZ	第四系沉积	FSS-3DBH
恒山	HSH	麻粒岩	BBVS-60	赤土	CHT	第四系沉积	FSS-3DBH
临城	LIC	片麻岩	3ESPC-60	北塘	BET	第四系沉积	FSS-3DBH
青龙	QIL	片麻岩	BBVS-60	塘 23	T23	第四系沉积	FSS-3DBH
迁西	QIX	片麻岩	BBVS-60	王匡	WAK	第四系沉积	FSS-3DBH
易县	YIX	片麻岩	BBVS-120	唐家河	TJH	第四系沉积	FSS-3DBH
秋树坪	QSP	片麻岩	BBVS-120	徐庄子	XZZ	第四系沉积	FSS-3DBH
岗南	GAN	砂砾岩	BBVS-60	沙井子	SJZ	第四系沉积	BBVS-60DBH
鹿泉	LUQ	砂砾岩	BBVS-60	宝坻	BAD	第四系沉积	FSS-3DBH
围场	WEC	闪长岩	3ESPC-60	糙甸	CAD	第四系沉积	FSS-3DBH
灵丘	LNQ	闪长岩	BBVS-60	丰台镇	FTZ	第四系沉积	FSS-3DBH
宣化	XUH	石灰岩	BBVS-60	武清	WUQ	第四系沉积	FSS-3DBH
蔚县	YUX	石灰岩	BBVS-60	芦台	LUT	第四系沉积	FSS-3DBH
安泽	ANZ	石灰岩	CMG-3ESPC	朱塘庄	ZTZ	第四系沉积	BBVS-60DBH
襄垣	XAY	石灰岩	BBVS-60	汉沽	HAG	第四系沉积	FSS-3DBH
晋祠	JIC	石灰岩	BBVS-120	青光	QIG	第四系沉积	FSS-3DBH
藁县	JIX	石灰岩	BBVS-120	安康	ANK	第四系沉积	FSS-3DBH
张家口	ZJK	石英粗面岩	BBVS-120	长虹	CHH	第四系沉积	FSS-3DBH
红山	HNS	石英砂岩	CTS-1	大直沽	DZG	第四系沉积	FSS-3DBH
兴隆东	XLD	石英砂岩	BBVS-60	南河镇	NHZ	第四系沉积	FSS-3DBH
四座楼	SZL	石英岩	BBVS-60	辛庄	XIZ	第四系沉积	FSS-3DBH
大连	DL2	石英岩	CTS-1	大沽	DAG	第四系沉积	FSS-3DBH
建昌	JCA	石英岩	BBVS-60	静海	JIH	第四系沉积	FSS-3DBH
北隍城岛	BHC	石英岩	BBVS-60	东台	DOT	第四系沉积	FSS-3DBH
长生寺	CSS	细砂岩	3ESP-60	蔡公庄	CGZ	第四系沉积	FSS-3DBH
张北	ZHB	玄武岩	BBVS-60	尤古庄	YGZ	第四系沉积	CMG-3TB
大山	DSH	玄武岩	BBVS-60	官港	GUG	第四系沉积	CMG-3TB

续表 1

台站名	代码	台基类型	地震计	台站名	代码	台基类型	地震计
琉璃庙	LLM	震旦系灰岩	BBVS-60	撒金坨	SJT	第四系沉积	CMG-3TB
金盏	JIZ	震旦系灰岩	FSS-3DBH	唐海	TAH	第四系黄土层	FSS-3DBH
八宝山	BBS	震旦系灰岩	BBVS-120	永清	YOQ	第四系黄土层	FSS-3DBH
西集	XIJ	震旦系灰岩	BBVS-60DBH	京唐港	JTG	第四系黄土层	FSS-3DBH
次渠	CIQ	震旦系灰岩	FSS-3DBH	遂城	SCH	第四系黄土层	FSS-3DBH
牛栏山	NLS	震旦系灰岩	FSS-3DBH	蠡县	LIX	第四系黄土层	FSS-3DBH
凤河营	FHY	震旦系灰岩	FSS-3DBH	河间	HEJ	第四系黄土层	FSS-3DBH
永年	YON	正长岩	3ESPC-60	黄骅	HUH	第四系黄土层	FSS-3DBH
赞皇	ZAH	白云岩	BBVS-60	新乐	XLE	第四系黄土层	FSS-3DBH
卢氏	LS	白云质灰岩	CMG-3ESPC	沧州	CAZ	第四系黄土层	FSS-3DBH
涉县	SXT	白云质灰岩	3ESPC-60	无极	WUJ	第四系黄土层	FSS-3DBH
邢台	XTT	白云质灰岩	3ESPC-60	谈固	TAG	第四系黄土层	FSS-3DBH
武安	WAT	白云质灰岩	3ESPC-60	赵县	ZHX	第四系黄土层	BBVS-60DBH
兴隆	XIL	白云质灰岩	BBVS-60	正定南	ZDN	第四系黄土层	FSS-3DBH

## 2 计算原理与方法

### 2.1 Q 值

在频率域中,从地震观测谱中扣除掉仪器响应、噪声和自由表面效应后,某一台站观测到的任一地震地面运动的剪切波位移谱可表示为:

$$A_{ij}(f) = A_{i0}(f)G(R_{ij})e^{-c(f)R_{ij}}S_j(f) \quad (1)$$

式中: $A_{ij}(f)$ 是第  $j$  个台站观测到第  $i$  个地震的位移谱; $A_{i0}(f)$ 是第  $i$  个地震的震源谱; $c(f)$ 是非弹性衰减系数; $S_j(f)$ 是第  $j$  个台站上的场地响应; $G(R_{ij})$ 为几何衰减函数,采用三段几何衰减模型,即:

$$G(R) = \begin{cases} R^{-b_1}, & R \leq R_{01} \\ R_{01}^{-b_1} \cdot R_{01}^{b_2} \cdot R^{-b_2}, & R_{01} \leq R \leq R_{02} \\ R_{01}^{-b_1} \cdot R_{01}^{b_2} \cdot R_{02}^{-b_2} \cdot R^{-b_3}, & R \geq R_{02} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $R_{01}$ 为直达波与过渡带的分界点; $R_{02}$ 为过渡带与  $S_n$  和  $L_g$  波的分界点,根据文献[2]和[7]的研究结果, $R_{01}$ 和  $R_{02}$ 分别相当于研究区 1.5 倍和 2.5 倍的地壳厚度,根据河北山区和平原的平均地壳厚度,山区取  $R_{01} = 60$  km、 $R_{02} = 100$  km,平原区  $R_{01} = 50$  km、 $R_{02} = 82$  km。 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  分别为直达波、过渡带及  $S_n$  和  $L_g$  波的几何扩散系数,根据 Atkinson 的结果,取  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  分别为 1.0、0、0.5。

将式(1)两边取对数可得:

$$\lg A_{ij}(f) = \lg A_{i0}(f) - \lg G(R_{ij}) - c(f)R_{ij} + \lg S_j(f) \quad (3)$$

非弹性系数  $c(f)$  与介质品质因子  $Q$  之间的关系为:

$$Q(f) = \frac{\lg(e)\pi f}{c(f)v_s} \quad (4)$$

Atkinson<sup>[7]</sup>计算非弹性衰减系数的原理为:(1)假设不同台站得到的同一地震的震源谱是相同的。先设所有台站的场地响应为 1(即不考虑场地响应),对给定的非弹性衰减系数  $c(f)$ ,通过对台站记录进行几何扩散和非弹性衰减校正,得到相应地震的震源谱振幅,调整  $c(f)$  值大小,使各台站得到的同一地震的震源谱振幅残差最小;设某个地震的震源谱是不同台站得到的震源谱振幅的平均,而各个台站的场地响应的对数就是该台站得到的震源谱振幅对数与该地震的震源谱振幅对数之差的平均值;(2)考虑各台站得到的场地响应,重新计算各台站经过校正的震源谱振幅,通过调整  $c(f)$  值,使对同一地震得到的震源谱振幅的残差最小。从而得到该区的非弹性衰减系数  $c(f)$ ,进而据式(4)得到介质的品质因子  $Q(f)$ 。

### 2.2 场地响应

采用 Moya 方法确定每次地震的震源谱参数和台站的场地响应<sup>[8]</sup>。假定每个台站的场地响应由任一地震事件得到的均一样,优质基岩的场地响应为 1。选用 Brune 震源破裂模型,场地响应可在震源参数已知情况下,由记录到不同地震事件的各台站记录而得到。运用遗传算法通过寻找不同的震源谱参数,使由不同事件得到的台站的场地响应的标准偏差最小。

计算场地响应的具体步骤为:

(1) 对第  $i$  个地震在第  $j$  个台站观测到的 SH 波傅里叶振幅谱进行几何扩散和非弹性衰减的校正。拟合第  $i$  个地震的所有台站的震源谱,得到第  $i$  个地震的震源谱参数( $\Omega_i$  和  $f_{ci}$ ,  $\Omega_i$  为低频幅值,  $f_{ci}$  为拐角频率);

(2) 已知每个震源的震源谱参数( $\Omega_i$  和  $f_c$ ),可

得到每个地震的理论震源谱:

$$A_{i0}(f) = \frac{\Omega_i}{1 + \left(\frac{f}{f_{ci}}\right)^2} \quad (5)$$

(3) 在第  $k$  个频率上, 第  $i$  个地震对第  $j$  个台站的场地响应:

$$S_{ij}(f_k) = \frac{\sigma_{ij}^{\text{corr}}(f_k)}{A_{i0}(f_k)} \quad (6)$$

(4) 在第  $k$  个频率上, 计算第  $j$  个台站的由不同地震得到的场地响应的平均值和标准偏差, 定义场地响应的目标函数为:

$$\delta_{jk} = \frac{\text{std}[S_{ij}(f_k)]}{\text{mean}[S_{ij}(f_k)]} \quad (7)$$

调整地震的震源参数, 用遗传算法使下式极小。

$$\text{residual} = \sum_j \sum_k \delta_{jk} \quad (8)$$

式(7)中: 分子是由  $i$  个地震得到的第  $j$  个台站在频点  $k$  的场地响应的标准偏差, 分母是由  $i$  个地震得到的第  $j$  个台站在频点  $k$  的场地响应的平均值。

根据反演得到的震源谱与理论谱的拟合度, 该台站场地响应图形的离散度及一致性、每个台站场地响应值的合理性, 调整参与反演的每个地震的震源谱的低频水平及拐角频率的上下限值, 重复上述步骤进行反演, 直到式(8)中值收敛到合理的范围。优质基岩台的场地响应在 1 附近摆动, 表明参与反演的地震的震源谱与理论震源谱的拟合度合理。

### 3 计算结果

#### 3.1 $Q$ 值结果

通过上述迭代反演可分别求得山区和平原区的非弹性衰减系数  $c(f)$ , 再据式(4)得到介质的品质因子  $Q(f)$ 。图 2 是反演得到的山区和平原区的  $Q(f)$ 。在考虑频率依赖的  $Q$  模型时, 通常用频率的幂函数, 即  $Q(f) = Q_0 f^\gamma$  的形式来拟合  $Q$  与频率的关系, 观察图 2 可发现, 在 1~20 Hz 的频率范围内,  $\lg Q$  与  $\lg f$  有很好的线性关系。拟合得到河北地区的  $Q$  值随频率的变化关系式为:

$$\begin{aligned} \text{山区:} & \quad Q = 474.8f^{0.3589} \\ \text{平原区:} & \quad Q = 294.5f^{0.5193} \end{aligned} \quad (9)$$

#### 3.2 场地响应

##### (1) 基岩台场地响应

迭代反演得到了 93 个基岩台的场地响应, 其中灰岩 19 个台、花岗岩 17 个台、震旦系灰岩 7 个、片麻岩 7 个、石灰岩 6 个、白云质灰岩 5 个、石英岩 4 个, 台数少于 4 个的还有奥陶系灰岩、石英砂岩、闪

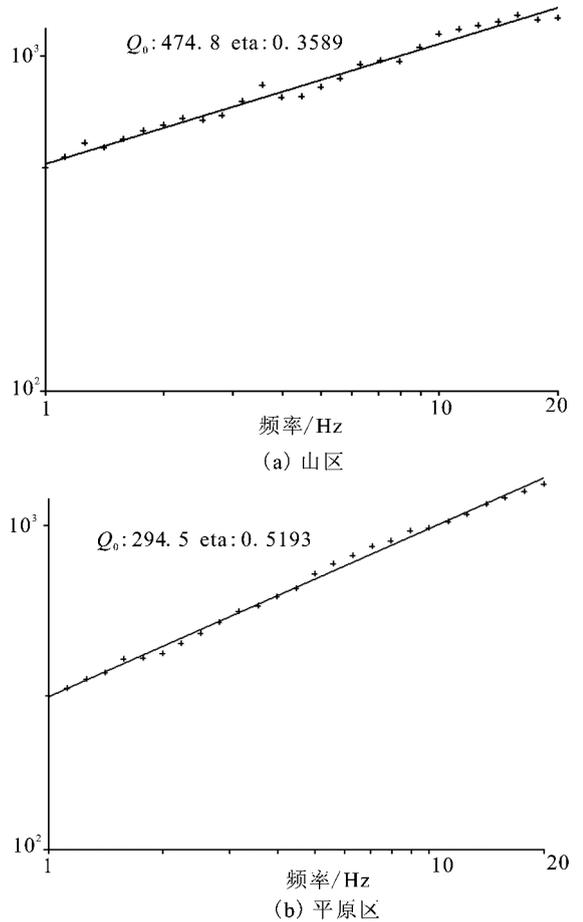


图 2 河北地区  $Q$  与频率的关系

长岩、玄武岩、白云岩、正长岩、细砂岩、斑状混合岩、古生代变质岩等 31 种基岩台基。

基岩台的场地响应随频率的变化较为复杂。不同类型的基岩台场地响应绝大多数无明显的一致性特征。只有石灰岩和震旦系灰岩台基的场地响应整体变化特征比较一致, 变化形态与沉积层类似, 表现为低频段呈放大作用, 高频段呈衰减效应。花岗岩在高频段无衰减特征。

根据场地响应随频率的变化形态分为五大类:

第一类: 如图 3(a), 台站场地响应与之类似的共有 47 个, 占基岩台的 50%, 频率在 1~20 Hz 内, 台站的场地响应基本在 1~2 中间摆动, 变化幅度小, 放大效应不明显;

第二类: 如图 3(b), 频率在 1~20 Hz 内, 台站的场地响应变化幅值不大, 主体基本在 2~4 之间变化, 对地震信号有较明显的放大作用。这类台站共有 9 个, 占基岩台的 9.7%。

第三类: 如图 3(c), 频率在 1~10 Hz 内, 台站的场地响应基本在 1~3 之间变化; 频率在 10~20

Hz, 场地响应随频率上升的趋势明显。这类台站共 有 5 个, 属个别情况。

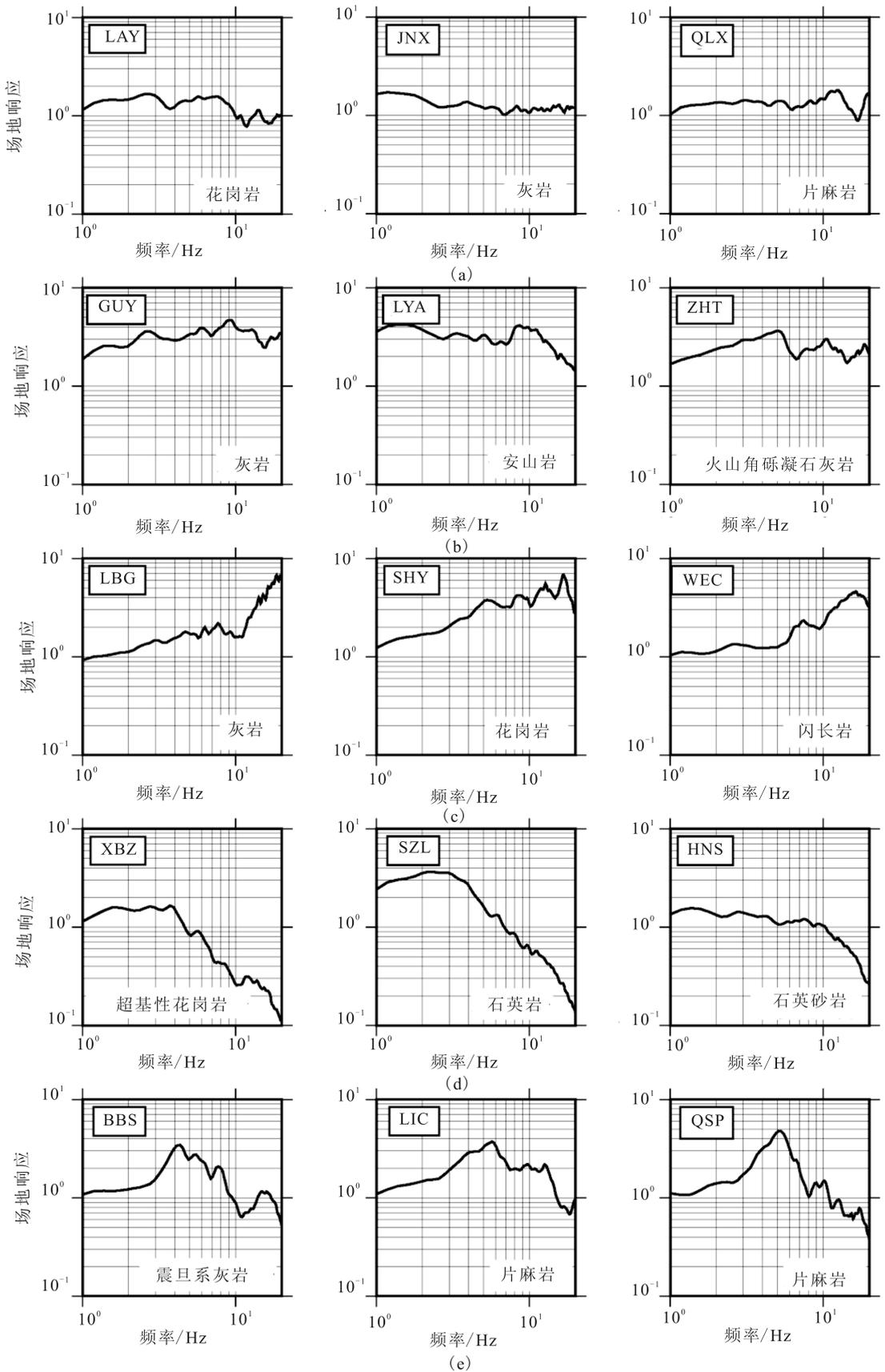


图 3 反演得到基岩台场地响应图例

第四类:如图 3(d),共有 27 个台(包括如前所述的石灰岩和震旦系灰岩台)的场地响应变化与之一致,占基岩台的 29%,表现为低频段 1~10 Hz,低频段右端的变化范围为 6~10 Hz,有一定程度的放大作用,不同的台站放大程度不同,台站场地响应值在 1~5 变化;高频段表现为衰减作用,随频率衰减作用有增强的趋势。放大与衰减的分界区域为 6~12 Hz。

等五类:如图 3(e),场地响应与之类似变化的台站属个别情况,共有 5 个台,LIC、BBS、QSP 等 5 个台站的场地响应在 4~6 Hz 之间有个较明显的峰值,台站场地响应值在 3~5。在低频段变化比较平稳,在 6~20 Hz 之间场地响应随频率下降趋势明

显,场地响应整体呈放大效应。

## (2) 井下台场地响应

反演得到了 58 个井下台的场地响应。如图 4(a)、(b)位于沉积层的井下台站的场地响应随频率变化的形态基本一致。这类台站有 52 个,占井下台的 90%,这类井下台的场地响应在低频段(1~7 Hz)表现为放大作用,在高频段(7~20 Hz)表现为衰减效应,放大与衰减的分界区域为 6~13 Hz。图 4(a)、(b)中 6 个台的场地响应变化展示了放大与衰减的分界点从高到低的变化,可能与沉积层的厚度、密度、孔隙度等物理性质的差异有关。有研究表明沉积层本身的放大作用与沉积层厚度正相关。随着地表沉积层厚度加大,中低频成分有效放大。

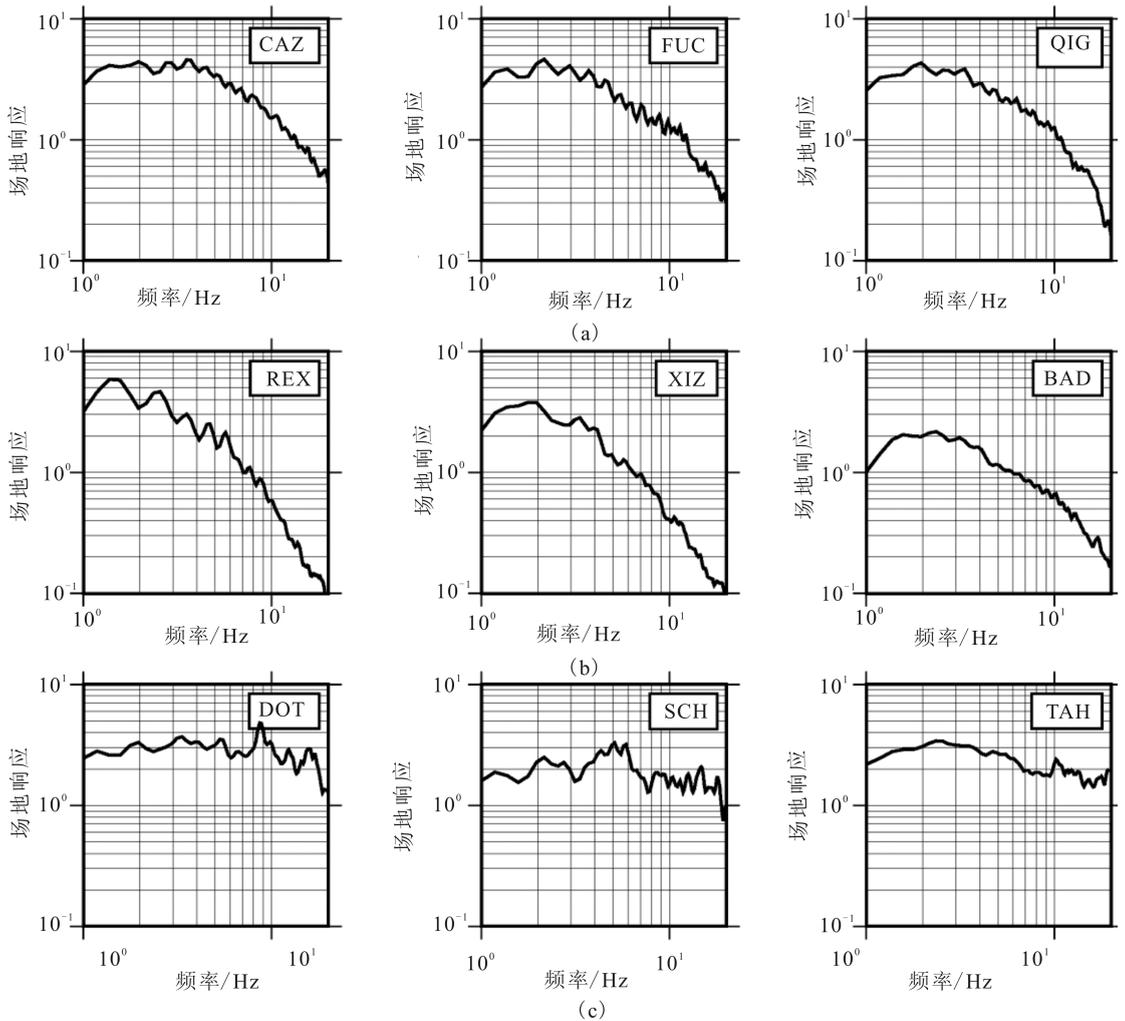


图 4 反演得到井下台场地响应图例

相对其他沉积层台站,图 4(c)中的台站场地响应变化比较平稳,频率在 1~20 Hz 内基本都表现为放大作用,与基岩台的第二类比较相似,这可能揭示了第四系沉积到沉积岩的变化中间过程。

## 4 讨论

### (1) 分区与非弹性衰减

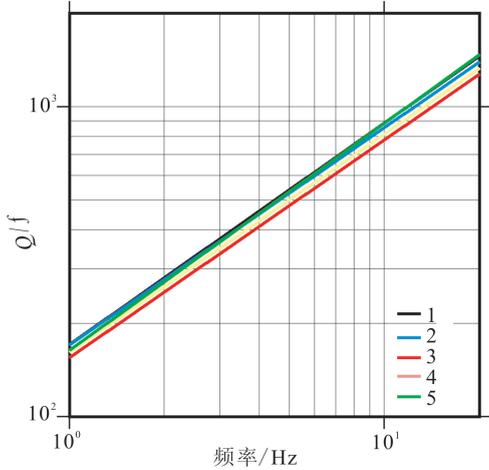
考虑到资料的可用性,山区和平原的分区原则

是相对的, 比如平原区就涵盖了太行山脉的部分区域, 这可能对平原区的  $Q(f)$  产生一些影响, 反演出的  $Q_0$  值可能比实际值偏高。

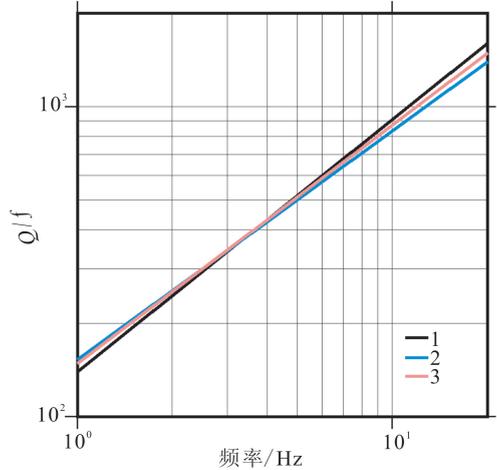
(2) 非弹性衰减比较

图 5(a) 中的黑线 1 是本研究反演出的山区非弹性衰减  $Q = 474.8f^{0.3589}$ 。高景春等<sup>[10]</sup> 曾用 2007 年以前“九五”首都圈河北台网的波形资料将石家庄

以北的河北区域分山区和平原进行了非弹性衰减研究, 得出山区结果为  $Q(f) = 385.9f^{0.4425}$ ; 王勤彩等<sup>[4]</sup> 计算出华北中北部  $Q$  结果为  $Q(f) = 420.8f^{0.384}$ ; 啜永清等<sup>[5]</sup> 计算出山西地区“九五”结果:  $Q(f) = 323.2f^{0.506}$ , “十五”结果:  $Q(f) = 420.7f^{0.369}$ 。从图 5(a) 可以看出各结果  $Q$  值随频率变化的趋势一致性很好, 离散度不大。



(a) 1. 为河北山区“九五”结果; 2. 为本研究山区结果; 3. 为华北中北部结果; 4. 为山西“九五”结果; 5. 为山西“十五”结果



(b) 1. 为河北平原“九五”结果; 2. 为本研究平原结果; 3. 为山东胶东地区结果

图 5 河北及邻区  $Q$  值随频率  $f$  变化关系的比较

图 5(b) 为本研究反演出的平原  $Q(f) = 294.5f^{0.5193}$ , 与高景春等计算出的“九五”平原结果:  $Q(f) = 202.5f^{0.6894}$  及季爱东计算出的山东胶东地区的  $Q(f) = 249f^{0.596}$  进行比较, 其  $Q$  值随频率变化的趋势一致性较好, 离散度不大。

(3) 山区与平原交界区台站的场地响应对比

山区与平原交界区域的台站有 4 个 (分别是 LBG、YIX、LBP 及 ZHT), 均参与了 2 区域的  $Q$  值计算及场地响应计算。LBG 台的场地响应平原反演结果整体高于山区反演结果; YIX、ZHT 台的场地响应山区反演结果整体高于平原反演结果; LBP 台的场地响应两者结果基本一致。总体来说, 山区与平原反演出 4 个台的场地响应形态一致, 总体偏差不大, 结果比较可靠。

5 结论

用 Atkinson(1992) 方法反演研究区域的  $Q$  值, 得到山区和平原的非弹性衰减  $Q$  随频率变化的关系式分别为:  $Q(f) = 474.8f^{0.3589}$  和  $Q(f) = 294.5f^{0.5193}$ , 并与本区和邻区已有的结果进行对比, 得出其各结果一致性较好。在此基础上, 利用 Moya

(2000) 方法进行了震源谱和场地响应的联合反演, 得到了山区 93 个基岩台、平原 58 个井下台站的场地响应。

基岩台的场地响应随频率的变化较为复杂。不同类型基岩台的场地响应无明显的一致性特征。JNX、CLI、QIX 等 47 个台站频率在 1~20 Hz 内, 场地响应基本在 1~2 中间摆动, 变化幅度小, 放大效应不明显; GUY、ZHT、LYA 等 9 个台站的场地响应主体基本在 2~4 之间变化, 对地震信号有较明显的放大作用。LBG、SHY、WEC 等 5 个台站的场地响应在低频段变化比较平稳, 基本在 1~3 之间变化频率为 6~20 Hz 时场地响应随频率上升的趋势明显。HNS、XBZ、JIX 等 27 个台站的场地响应变化形态与沉积层类似, 表现为低频段呈放大作用, 高频段呈衰减效应。LIC、BBS、QSP 等 5 个台站的频率在 4~6 Hz 之间有个较明显的峰值, 场地响应值在 3~5 间, 在低频段变化比较平稳; 6~20 Hz 间场地响应随频率下降趋势明显, 且整体呈放大效应。因此, 无论从基岩台场地响应的形态还是值的变化范围来看, 都不能将基岩台的场地响应简单取 1。

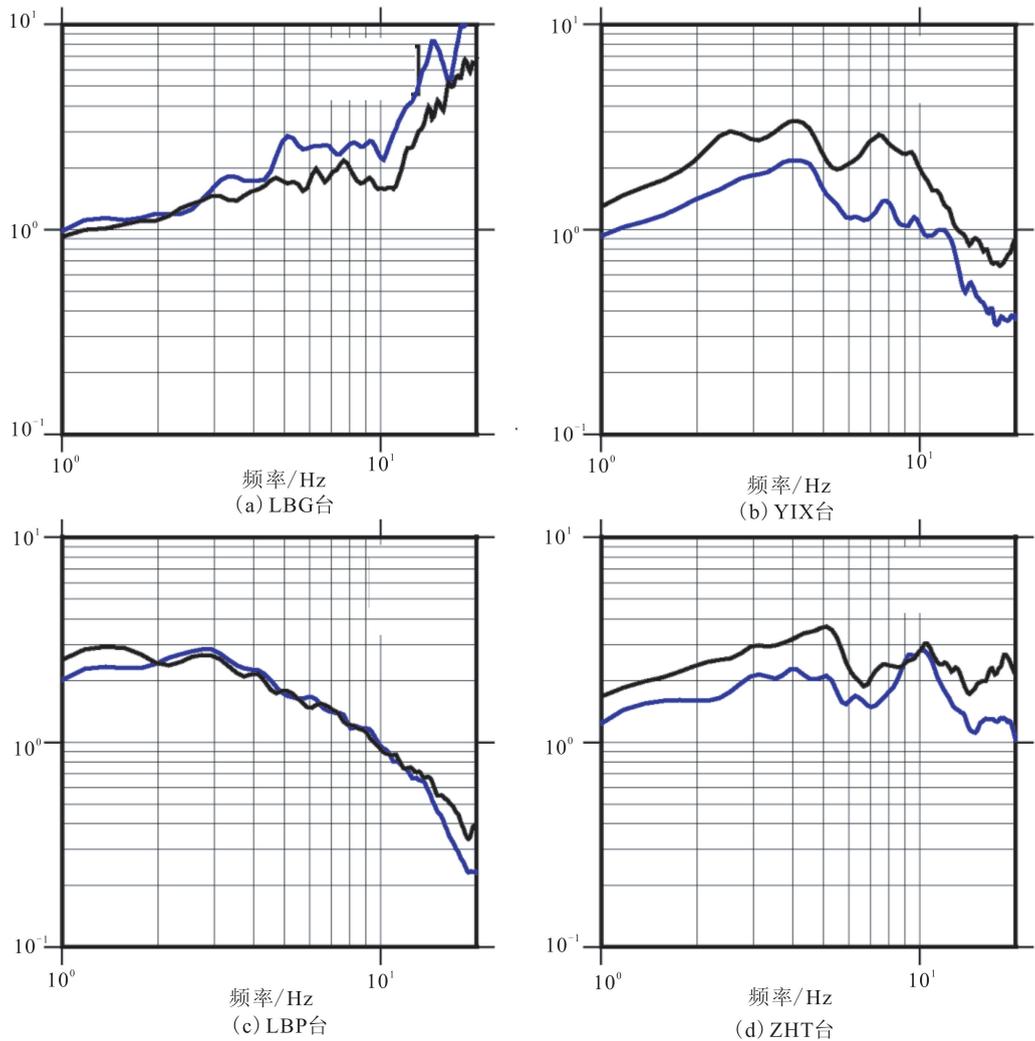


图6 山区与平原交界区的台站场地响应对比  
(黑线为山区反演结果;蓝线为平原反演结果)

井下台站的场地响应随频率变化的形态基本一致,90%的井下台场地响应在低频段表现为放大作用,在高频段(7~20 Hz)表现为衰减效应,放大与衰减的分界区域为6~13 Hz。

### 参考文献

- [1] Rogers A M, Tinsley J C, Hays W H, et al. Evaluation of the Relation between Near-surface Geological units and Ground Response in the Vicinity of Long Beach, California[J]. Bull. Seism Soc Am, 1979, 69: 1603-1622
- [2] 黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 等. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 54-61.
- [3] 赵翠萍, 张智强, 夏爱国, 等. 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, 2004, 24(3): 300-305.
- [4] 王勤彩, 高景春, 郑斯华, 等. 华北中北部地面运动衰减研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(3): 313-319.
- [5] 啜永清, 苏燕, 贾建喜, 等. 山西地区非弹性衰减系数、场地响应和几种震源参数的研究[J]. 地震学报, 2004, 26(4): 369-378.
- [6] 兰从欣, 刘杰, 郑斯华, 等. 北京地区中小地震震源参数反演[J]. 地震学报, 2005, 27(5): 498-507
- [7] Atkinson G M, Mereu R F. The Shape of Ground Motion Attenuation Curves in Southeastern Canada[J]. Bull. Seism Soc Am, 1992, 82(5): 2014-2031.
- [8] Moya A, Jorge A. Inversion of Source Parameters and Site Effects from Strong Ground Motion Records using Genetic algorithms[J]. Bull. Seism Soc Amer, 2000, 90(4): 977-992.
- [9] 高文学, 马瑾. 首都圈地震地质环境与地震灾害[J]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [10] 高景春, 赵英萍, 徐志国, 等. 河北省测震台网中小地震矩震级的测定[J]. 华北地震科学, 2011, 29(2): 1-5.