

于俊谊, 朱新运. 2016. 浙江地区 Lg 波路径衰减关系及台站场地响应参数. 地震学报, 38(1): 103–110. doi:10.11939/jass.2016.01.010.

Yu J Y, Zhu X Y. 2016. Lg-wave attenuation relationship and site response of stations in Zhejiang area. *Acta Seismologica Sinica*, 38(1): 103–110. doi:10.11939/jass.2016.01.010.

浙江地区 Lg 波路径衰减关系及台站场地响应参数^{*}

于俊谊^{*} 朱新运

(中国杭州 310013 浙江省地震局)

摘要 基于浙江省数字地震台网 2007—2012 年记录的台湾地区 355 次 $M_s \geq 4.0$ 地震的波谱比数据, 使用场地响应与路径衰减联合反演的方法, 对穿越台湾海峡特定路径的 Lg 波衰减关系及浙江地区 36 个测震台站的场地响应参数进行了计算。计算中选取频率为 1—7 Hz、间隔为 0.2 Hz, 计算得到了三分向(U-D, N-S, E-W)的衰减关系及场地响应参数。三分向衰减参数关系为 $\gamma_{UD}(f) = 0.0055 f^{0.94}$, $\gamma_{NS}(f) = 0.0064 f^{1.11}$ 和 $\gamma_{EW}(f) = 0.0048 f^{0.90}$ 。浙江地区 36 个台站均获得了稳定的场地响应, 其中庆元台在高频端表现出较明显的放大效应, 其它台站在所研究的频率范围内各分向场地响应大致相当, 并未显示出明显的方向性特征。最后对场地响应的异常部分进行了具体分析和验证, 表明本文计算结果正确可靠。

关键词 Lg 波 场地响应 路径衰减 联合反演 波谱

doi:10.11939/jass.2016.01.010 中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A

Lg-wave attenuation relationship and site response of stations in Zhejiang area

Yu Junyi^{*} Zhu Xinyun

(Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China)

Abstract: Based on the spectral ratio data, the Lg-wave attenuation relationship along a specific path across Taiwan Strait and the site response from 36 stations in Zhejiang area were calculated by using the joint inversion method of field response and the path attenuation. We used the data of 355 $M_s \geq 4.0$ earthquakes during the period of 2007—2012, which were recorded by Zhejiang digital seismic network in Taiwan region. During the calculation process, the data in the frequency range of 1—7 Hz were selected with the interval of 0.2 Hz. The attenuation relationships are $\gamma_{UD}(f) = 0.0055 f^{0.94}$, $\gamma_{NS}(f) = 0.0064 f^{1.11}$ and $\gamma_{EW}(f) = 0.0048 f^{0.90}$ in U-D, N-S and E-W direction. The site response at high-frequency end of Qingyuan station showed an obvious amplification effect, meanwhile, the site response of the other 35 stations are nearly equal

* 基金项目 中国地震局星火计划攻关项目(XH12023)和测震台网青年骨干培养专项(20130207)共同资助。

收稿日期 2015-05-21 收到初稿, 2015-08-17 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: yqljyj@163.com

without obvious direction characteristic. Furthermore, the abnormal results were analyzed and verified, suggesting the results in this paper be correct and reliable.

Key words: Lg wave; site response; path attenuation; joint inversion; spectrum

引言

地震记录受路径衰减、场地响应、仪器响应、几何扩散、地震辐射的方向性等多种因素的影响(陈运泰等, 2000). 几何扩散、仪器响应和地震辐射的方向性等因素在实际计算过程中较容易区分并剔除, 在适当的条件下甚至可以将其忽略, 但要将路径衰减与场地响应区分开却很困难. 为了处理方便, 一些地震波衰减方面的研究将场地响应完全忽略, 然而即便是同一地区相距较近的台站, 其场地响应也可能有较大的差异, 因此完全忽略场地响应势必会使路径衰减关系产生较大的误差. 为了分离场地响应而获得更精确的路径衰减关系, Chun 等(1987)提出了逆向双台谱比法, 该方法在计算 Lg 波衰减参数方面较为可靠, 但是过于苛刻的资料选取条件致使其无法得到广泛应用. 朱新运和陈运泰(2007)以及 Zhu 和 Chen(2012)在谱比法基础上, 提出了场地响应与路径衰减联合反演的方法, 该方法通过地震波谱比扣除震源、几何衰减及地震辐射方向性等因素的影响, 通过数学计算在观测谱比中提取场地响应与路径衰减的相关参数, 所取得的结果稳定可靠.

浙江地区属于少震、弱震区, 根据历史地震记录, 迄今为止该地区尚未发生过 $M \geq 6.0$ 地震. 浙江地区地处东部沿海地带, 经济较发达, 水库、核电站等大型生命线工程较多, 抗震要求高. 虽然浙江地区地震较少, 但外围的台湾地区地震、东海地震及日本地震对该地区的影响较大. 例如 2006 年 10 月 12 日台湾宜兰发生 $M_s 5.9$ 地震, 尽管距震中 600 多千米, 但杭州市区的高层建筑内震感仍然强烈. 根据地震工作的需要, 浙江省已建成了高密度、大动态范围的数字地震观测台网, 对台湾及临近海域发生的 $M_s \geq 4.0$ 地震大部分台站均能够获得良好的波形记录, 利用这些资料可以开展该区域固定路径上地下介质衰减及场地响应特征的研究.

朱新运等曾使用地震波衰减与场地响应联合反演的方法计算了相似路径上 Lg 波衰减系数及浙江省域的场地响应(朱新运, 陈运泰, 2007; Zhu, Chen, 2012), 但由于当时条件所限, 使用的地震事件仅有 20 个, 有效参与评估的台站只有 16 个. 而目前浙江省域台站已增至 49 个, 记录到的台湾地区地震数量和质量均有较大提高, 且当时计算结果中场地响应异常的庆元台也已进行了迁址. 因此再次对该区域的台站场地进行评估, 特别是对迁址前后庆元台的场地响应进行评估以及对台湾海峡的 Lg 波路径衰减关系计算是非常有意义的.

1 资料选取及处理

1.1 资料选取

本文采用朱新运和陈运泰(2007)提出的方法, 其要求衰减参数保持稳定, 即构造体单一或传播路径单一. 对浙江地区而言, 台湾及邻近海域发生地震的地震射线均穿过台湾海峡, 尽管地质构造复杂, 但路径单一, 满足该算法对资料的要求. 本文将浙江省台站记录到的台湾地震作为主要资料, 所选取地震的相关参数均引自台湾气象局(2014)所公布的定位结果.

计算中主要使用 Lg 波。Lg 波是 Prees 和 Ewing(1952)在研究北美地区地震记录时所发现的。一般认为 Lg 波是在地壳中经过多次反射形成的, 是稳定大陆地区短周期记录中最典型的震相, 具有易于观察且振幅稳定的特点, 因此用 Lg 波进行场地响应的计算可以得到更为稳定的计算结果。

本文从台湾地区 $M_s \geq 4.0$ 地震中选取台站记录信噪比较高的地震, 从中剔除有断记、限幅以及有时钟钟差和临时更换备用仪器等问题的台站记录。由于较大地震的破裂尺度较大、破裂时间较长, 在计算时会引入较大误差, 因此本文对 $M_s > 6.0$ 地震也进行了剔除。浙江省区域数字地震台网于 2007 年对大部分地震台的测震仪器进行了升级改造, 且对个别台站更换了地理位置。考虑到观测数据的连续性和一致性, 本文仅使用升级改造完毕后的台站数据记录进行计算; 最终选取了台湾地区 2007 年 11 月—2013 年底的地震共计 355 次, 其震级范围为 $M_s 4.0$ —6.0, 台站震中距范围为 300—1000 km。地震观测台站的场地类型均为基岩, 分布于浙江省内, 地震射线路径较为单一, 确保满足地震波衰减空间变化较小的要求。地震震中和台站分布及地震射线路径如图 1 所示。

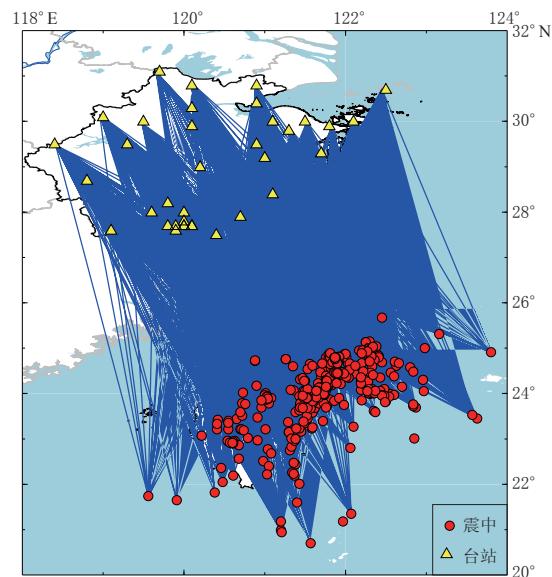


图 1 所选地震震中和台站分布
及 Lg 波地震射线路径图

Fig. 1 Distribution of epicenters (circles) and stations (triangles) as well as Lg wave ray paths

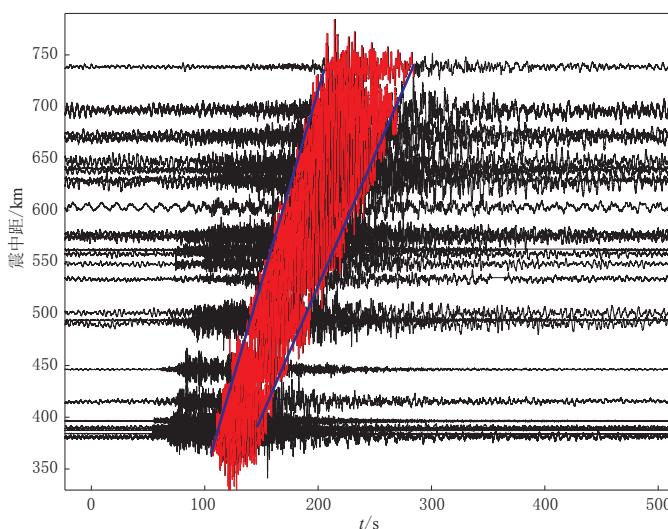


图 2 本文所使用的 2.6—3.6 km/s 速度窗截取的地震波形

Fig. 2 The seismic waveforms cut in the window of 2.6—3.6 km/s used in this study

1.2 资料处理

Lg 波的到时可以从震相清晰的地震记录中读取,但是很多地震记录中的 Lg 震相并不清晰,因此本文使用速度窗对 Lg 波进行截取。已有研究获得的中国东部地区 Lg 波的传播速度为 3.54 km/s,而 Lg 波的速度底限为 2.6 km/s (Murphy, Bennett, 1982; Campillo *et al.*, 1985; 葛焕称等, 1985),因此本文选取 Lg 波的速度范围为 2.6—3.6 km/s。

Campillo 等(1985)关于法国中部的 Lg 波衰减参数的研究结果表明, 使用不同速度窗(如 2.3—2.6, 2.6—3.1, 3.1—3.6 km/s)计算得到的 Lg 波衰减参数相差不大, 故认为速度窗的范围对 Lg 波衰减参数的影响是可以忽略的。本文使用 2.6—3.6 km/s 的速度窗截取波形(图 2), 并对其以补零的方法扩展至最近的 2^n ($n \in \mathbf{Z}$) 的整数次方。为防止谱泄露, 对得到的波形两端加 2% 的余弦窗进行傅里叶变换、仪器校正及几何衰减校正, 并以 3 个频率采样步长进行平滑处理, 谱如图 3 所示。

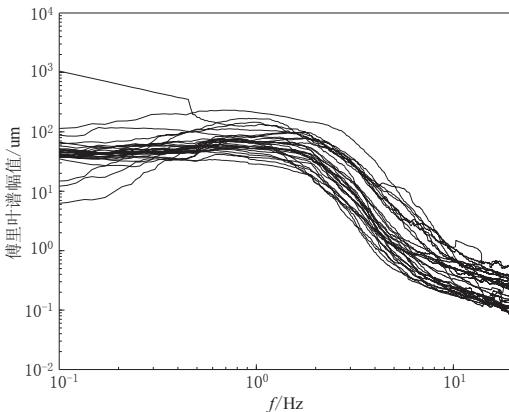


图 3 Lg 波速度窗截取部分的波谱图

Fig. 3 Spectra of the Lg waves cut in the window as shown in Fig. 2

2 计算结果及分析

2.1 衰减参数

计算过程中,首先在 1—7 Hz 的频率范围内对所取波形进行几何校正和仪器响应校正;然后以 0.2 Hz 间隔进行采样,构造矩阵方程并求解得到衰减参数及场地响应参数;最后对衰减参数进行 $\gamma(f)=\alpha f^\beta$ 形式的拟合,得到垂直、南北、东西三分向的衰减参数关系分别为 $\gamma_{UD}(f)=0.0055f^{0.94}$, $\gamma_{NS}(f)=0.0064f^{1.11}$, $\gamma_{EW}(f)=0.0048f^{0.90}$ 。

葛焕称等(1985)得到了中国东部地区的 Lg 波衰减参数,用最大振幅所得的 γ 值为 0.003—0.005;朱新运和陈运泰(2007)使用与本文相同的方法,所得结果为 $\gamma_{UD}(f)=0.00175f^{0.43485}$, $\gamma_{NS}(f)=0.0021f^{0.41241}$, $\gamma_{EW}(f)=0.00145f^{0.48467}$,但因频率范围不同,本研究结果与该结果有所不同。Herrmann 和 Kijko(1983)获取的美国中北部地区的 Lg 波衰减参数为 $\gamma(f)=0.001f^{0.7}$; Hasegawa(1985)得到的加拿大地盾的 Lg 波衰减参数为 $\gamma(f)=0.001f^{0.8}$; Chun 等(1987)基于逆向双台谱比法,分别采用固定时间窗和固定速度窗得到加拿大东部地区的 Lg 波衰减参数分别为 $\gamma(f)=(0.001 \pm 0.1)f^{0.74 \pm 0.05}$ 和 $\gamma(f)=(0.00081 \pm 0.08) \times f^{0.81 \pm 0.08}$ 。对比可见,本研究所得到的结果与上述结果大致相似。

2.2 场地响应

参与评估的浙江地区 36 个地震台站均为基岩场地,大部分台站的场地响应幅值为 1—3;杭州台、黄坦台、衢州台、黄龙台等 4 个台站的场地响应幅值为 1—4;仰山台的南北向场地响应在高频端略超出 5;庆元台的场地响应幅值在高频端可达 10—20,高频端放大作用较明显。除庆元台外其它台站均未表现出明显的放大作用。

根据计算所得场地响应幅值将 36 个地震台站大致分为 6 类,如表 1 所列。各台站的场

地响应如图 4 所示。可以看出：表 1 中 1 类和 2 类台站共有 12 个，其中 8 个台站处于浙北沿海地区的同一区域内；这些台站的场地响应幅值较小，可能与台站基岩质量及基岩岩性有关；所有参与评估的 36 个台站中，宁海台的场地响应幅值在 1—7 Hz 范围内均接近 1，在大部分频率处为所有参评台站的最低值；除庆元台和仰山台外，其它台站的场地响应幅值均为 1—4；仰山台的两个水平向场地响应幅值均在 4 以下，而高频端的垂直向场地响应

表 1 台站响应分类

Table 1 Stations sorted by site response

| 类别 | 台站名(台站代码) | 台站场地响应幅值范围 |
|----|---|-------------------|
| 1 | 宁海(NIH), 舟山(ZHS), 鄞县(YIX), 嵊泗(SHS) | 1—2 |
| 2 | 乐清(YUQ), 永康(YOK), 余姚(YUY), 海盐(HAY), 嘉兴(JAX), 宁波(NIB), 泰顺(TSH), 温州(WEZ) | 1—2, 少部分略超出 2 |
| 3 | 珊溪(SX), 淳安(CHA), 峰源(FY), 景宁(JIN), 桐庐(TOL), 新安江(XAJ), 新昌(XIC), 新浦(XP), 苍南(CAN) | 1—3 |
| 4 | 北仑(BEL), 包垟(BY), 长兴(CHX), 湖州(HUZ), 临安(LIA), 天台(TIT), 万阜(WF), 萧山(XSH), 云湖(YH) | 基本为 1—3, 少部分略超出 3 |
| 5 | 杭州(HAZ), 黄坦(HT), 衢州(WXJ), 黄龙(HL) | 1—4 |
| 6 | 仰山(YS), 庆元(QIY) | 最高超出 5 |

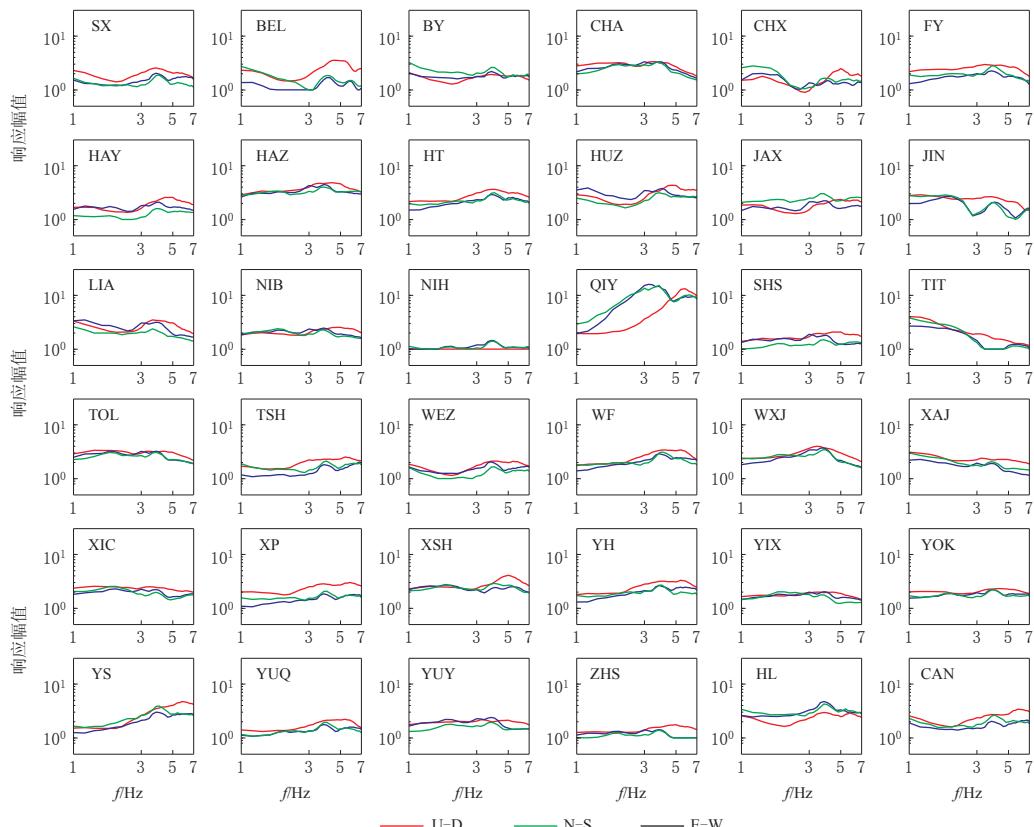


图 4 参与评估的 36 个地震台站的场地响应

Fig. 4 Site response of the 36 stations for estimation

幅值超过 5；庆元台在 $f > 2$ Hz 频段的放大作用明显，场地响应幅值在 5 以上，最大值超过 20.

2.3 场地响应结果分析

针对仰山台和庆元台场地响应幅值较高的现象，本文进行了验证分析。一般而言，台站场地响应幅值较高，在地震台站记录中表现为地震事件的振动幅度大，由此确定的震级就会偏大。因此本文通过仰山台和庆元台在地震记录中测得的地震震级来对场地响应计算结果的正确性进行检验。2007 年 11 月—2013 年底浙江省域内发生且仰山台和庆元台均有记录的地震共 28 次，对该地震记录中仰山台和庆元台的单台震级进行统计，统计结果如图 5 所示。可以看出：仰山台单台测得的震级均大于或等于多台平均震级，但震级偏差较小，最大偏差震级为 +0.2，平均偏差震级为 +0.07；庆元台单台测得的震级均大于多台平均震级，且与多台平均震级的偏差较大，其中最大偏差震级为 +1.1，平均偏差震级为 +0.65。

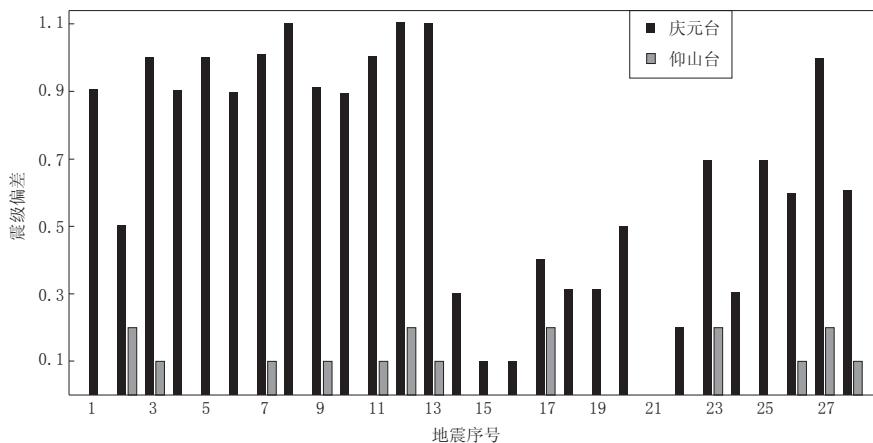


图 5 庆元台和仰山台记录地震的震级偏差统计结果

Fig. 5 Statistics on magnitude deviation of earthquakes recorded by the stations Qingyuan and Yangshan used in this paper

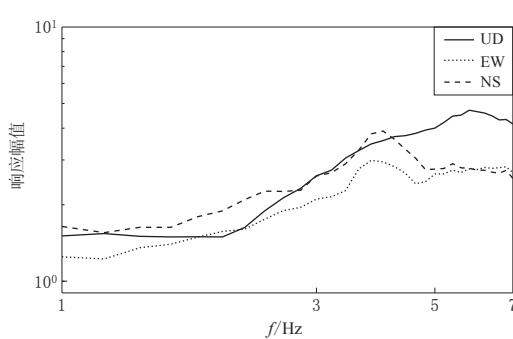


图 6 仰山台场地响应图

Fig. 6 Site response of the station YS

了 5。因为震级是由两个水平向记录确定的，因此垂直向的场地响应幅值较大并不会造成实际量取的震级偏差较大。可见，仰山台单台震级与多台平均震级偏差较小的现象与本文场地响应计算结果相符。

场地响应计算结果中庆元台的场地响应幅值较大，实际地震观测记录中庆元台测得的单台震级也偏大，这说明本研究得到的场地响应结果与实际情况相符。但场地响应计算结果中仰山台场地响应幅值也偏大，而实际地震观测记录中仰山台的单台震级与多台平均震级偏差不大。图 6 给出了计算结果中仰山台的台站响应。可以看出，仰山台的两个水平向场地响应幅值基本在 4 以下，只有垂直向的场地响应幅值在 4—7 Hz 范围内超过 4 且最大值超过了 5。因为震级是由两个水平向记录确定的，因此垂直向的场地响应幅值较大并不会造成实际量取的震级偏差较大。可见，仰山台单台震级与多台平均震级偏差较小的现象与本文场地响应计算结果相符。

由于庆元台单台震级与多台平均震级偏差较大,且台站周边环境噪声水平高,所以“十一五”项目期间,浙江省地震局对庆元台进行了整体搬迁改造。搬迁后的庆元台迁至原台址西约 1.5 km 处,改为深井观测。而在搬迁后的庆元台建成试运行及通过验收前,原有的庆元台并未停止数据记录,因此在这段时间内两个庆元台是同时运行的,为这两个台站的记录进行对比创造了条件。

搬迁后的庆元台(QIU)于 2014 年 3 月开始试运行,至 2014 年 4 月 9 日两个庆元台同时记录到的台湾地区地震共 8 次,其详细信息见表 2。本文基于这 8 次台湾地区的地震记录,使用传统谱比法将庆元台与搬迁后的庆元台的台站场地响应进行对比,结果见图 7。用 355 次台湾地震计算所得的庆元台(QIY)场地响应结果如图 8 所示。

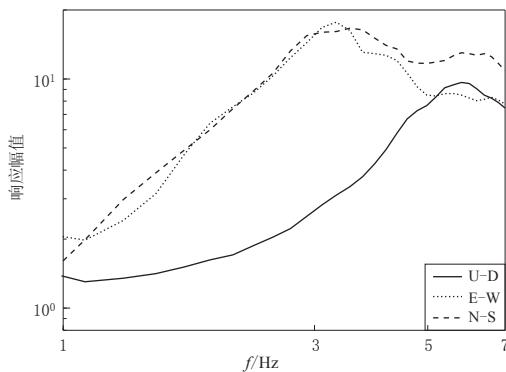


图 7 以搬迁后的庆元台(QIU)为参考台站计算得到的庆元台(QIY)的场地响应结果

Fig. 7 Site response of the station QIY with the station QIU as standard station

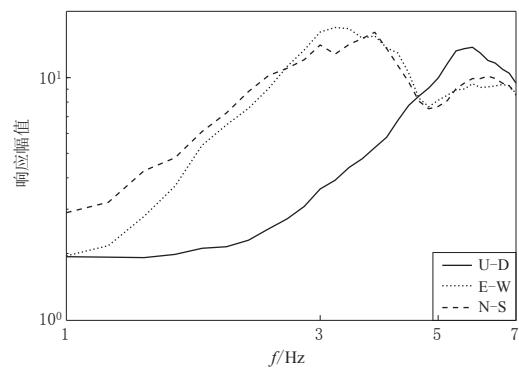


图 8 利用 355 次台湾地震计算得到的庆元台(QIY)的场地响应结果

Fig. 8 Site response of the station QIY calculated by using the data from 355 earthquakes in Taiwan area

表 2 搬迁后的庆元台(QIU)记录到的 8 次台湾地区地震

Table 2 Eight earthquakes in Taiwan area recorded by the station QIU

| 序号 | 发震时间 | | 北纬/° | 东经/° | 震源深度/km | M_L |
|----|------------|------------|-------|--------|---------|-------|
| | 年-月-日 | 时:分:秒 | | | | |
| 1 | 2014-03-16 | 04:04:36.5 | 22.23 | 121.36 | 13.2 | 5.2 |
| 2 | 2014-03-17 | 21:12:57.2 | 24.06 | 122.37 | 15.8 | 5.3 |
| 3 | 2014-03-19 | 20:19:27.0 | 24.05 | 122.27 | 16.2 | 5.6 |
| 4 | 2014-03-05 | 00:01:40.8 | 23.19 | 120.74 | 5.6 | 4.4 |
| 5 | 2014-03-29 | 23:56:54.2 | 24.36 | 122.19 | 29.4 | 4.3 |
| 6 | 2014-04-01 | 08:11:22.9 | 23.95 | 121.09 | 23.4 | 4.3 |
| 7 | 2014-04-02 | 00:09:41.3 | 24.08 | 121.32 | 71.6 | 4.4 |
| 8 | 2014-04-09 | 01:33:25.1 | 23.69 | 121.76 | 42.5 | 4.3 |

从图 7 和图 8 可以看出,两次计算结果中庆元台(QIY)的场地响应曲线大致相似,只是略有区别。这主要是由于参考台站的不同所造成的。前次计算总体来看大部分频段是以宁海台为参考台站的(图 8),而后面的验证计算则是以搬迁后的庆元台(QIU)为参考台站(图 7),这也从另一个方面验证了本文计算结果的正确性。

3 讨论与结论

本文在谱比法的基础上,通过路径衰减与场地响应联合反演的方法,计算了穿过台湾

海峡较为单一路径的 Lg 波路径衰减和浙江地区地震台站的场地响应。该方法不依赖于震源模型，但考虑了震源的影响，减少了以往其它方法由于简化而引入的误差。

本文给出的 Lg 波衰减参数 γ_0 结果与朱新运和陈运泰(2007)一文给出的衰减参数存在差异，这是源于该文使用的频率为 0.5—10 Hz，而且在 7 Hz 以上地震波衰减参数发生了趋势性变化。由此可以认为这种差异可能是由于所使用的频率段不同所引起的，而本文给出的场地响应结果与该文中所对应台站的场地响应结果是完全一致的。

场地响应与区域岩石基底之间的相关性较大，本文对计算结果中场地响应幅值较大的台站与该台站记录的震级偏差进行了比较，结果表明场地响应幅值较大的台站所记录的地震震级大于多台记录的平均震级，这与场地响应对震级影响的理论一致。关于基于搬迁前后庆元台记录到的台湾地震数据计算所得的两个台站的场地响应相对值，其计算结果与本文前次计算结果一致，说明利用本文方法得到的场地响应是可靠的。

参 考 文 献

- 陈运泰, 吴忠良, 王培德, 许力生, 李鸿吉, 牟其铎. 2000. 数字地震学[M]. 北京: 地震出版社: 1—14.
- Chen Y T, Wu Z L, Wang P D, Xu L S, Li H J, Mu Q D. 2000. *Digital Seismology*[M]. Beijing: Seismological Press: 1—14 (in Chinese).
- 葛煥称, 叶培元, 黄才中, 陆振飞. 1985. 中国东部地区 Lg 波的衰减和近震震级[J]. 华北地震科学, **3**(4): 1—14.
- Ge H C, Ye P Y, Huang C Z, Lu Z F. 1985. Lg wave attenuation and near shock magnitude in the eastern region of China[J]. *North China Earthquake Sciences*, **3**(4): 1—14 (in Chinese).
- 台湾气象局. 2014. 地震活动汇整[EB/OL]. [2014-12-24]. http://www.cwb.gov.tw/V7/earthquake/rtd_eq.htm.
- Taiwan Weather Bureau. 2014. Earthquake report[EB/OL]. [2014-12-24]. http://www.cwb.gov.tw/V7/earthquake/rtd_eq.htm.
- 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 Lg attenuation using Lg waveform[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **20**(6): 605—616.
- Campillo M, Plantet J L, Bouchon M. 1985. Frequency-dependence 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.
- Hasegawa H S. 1985. Attenuation of Lg waves in the Canada shield[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **75**(6): 1569—1582.
- Herrmann R B, Kijko A. 1983. Modeling some empirical vertical component Lg relation[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **73**(1): 157—171.
- 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.
- Prees F, Ewing M. 1952. Two slow surface waves across North America[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **42**(3): 219—228.
- 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.