

doi:10.3799/dqkx.2016.146

华北盆地 Lg 波衰减及台站场地响应特征

朱新运

浙江省地震局, 浙江杭州 310013

摘要: 华北盆地是中国大陆地震活跃区之一, 通过地震波衰减及场地响应参数研究该区构造介质属性及台基属性对地震预测预报、灾害评估具有重要意义. 基于 Lg 波谱比的联合反演方法是获得地震波衰减参数及场地响应的有效方法, 通过随机重采样方法可以检验解的稳定性. 使用华北盆地 68 个台站记录的 2004—2008 年的 149 次地震, 震级 M_L 为 1.7~5.3 的震中距为 100~600 km, 按信噪比大于 2 的标准挑选有效垂向记录 1 000 多条, 地震射线较好地覆盖了华北盆地 $38^\circ\text{N}\sim 41^\circ\text{N}$ 、 $114^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$ 区域. 采用 2.60~3.65 km/s 的速度窗截取 Lg 波形并转化为频谱, 研究频率范围为 1~7 Hz, 频率间隔 0.2 Hz. 计算得到的地震波衰减品质因子 $Q(f)$ 与频率 f 的关系可表示为 $Q(f) = 125 \pm 4.4f^{0.86 \pm 0.03}$, 研究区为低 Q_0 (对应频率 1 Hz), 高频率依赖性的构造活跃区. 基岩台站对地震波没有表现出明显放大作用, 黄土沉积台站低频端比高频端明显放大; 场地响应波动较大台站其解的标准偏差也大, 说明场地响应的不稳定性体现了台基属性的非稳定性特征.

关键词: 场地响应; 衰减; 联合反演; 解的稳定性; 地震.

中图分类号: P315.3

文章编号: 1000-2383(2016)12-2109-09

收稿日期: 2016-02-11

Characteristics of Lg Wave Attenuation and Site Response in North China Basin

Zhu Xinyun

Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China

Abstract: North China basin is one of the active seismic regions in the mainland of China. Studies of Lg wave attenuation and site responses can be used for tectonic interpretation, seismic hazard assessment and earthquake prediction. A combined inversion method based on seismic spectral ratios is an effective method for estimating attenuation and site responses. In this paper, a random resampling method is used to check stability of the solutions. Over 1 000 vertical seismograms with signal-to-noise ratio greater than two from 149 events were analyzed. The seismograms are recorded in the distance range of 100–600 km, the earthquakes occurred between 2004 and 2008 in the region and varied in magnitude between 1.7 and 5.3 (M_L). The ray-paths cover the region ranging from 38°N to 41°N and 114°E to 120°E . Fourier spectral amplitudes are measured from Lg phases windowed between the group velocity limits 2.60 and 3.65 km/s. The inversion is performed in a frequency range of 1–7 Hz with an interval of 0.2 Hz. The region displays low Q_0 and a strong frequency dependence characterized by function $Q = 125 \pm 4.4f^{0.86 \pm 0.03}$. The result is consistent with the geology of the active tectonic region. The rock sites show small amplification. For soil sites, the amplification of low-frequency waves is higher than that for high-frequency waves. For the stations with more amplification, the corresponding error bar is great. This may indicate that the instability of the bases of these stations reduces the stability of the solution.

Key words: site response; attenuation; joint inversion; stability of solution; earthquakes.

华北盆地位于中国大陆北部, 地处燕山以南, 太行山以东, 南以广饶—聊城断裂为界, 东与渤海湾相接, 郯庐断裂带穿过渤海湾构成其东界. 在地质演化

过程中, 由于不均匀张裂和沉降, 形成复杂的断层分布特征, 地形地貌上隆凹相间, 是典型的多次张裂盆地(黄金莉和赵大鹏, 2005), 新生代以来, 研究区及

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No. 41090291); 中国地震局星火计划项目(No. XH12023).

作者简介: 朱新运(1968—), 男, 研究员, 主要从事地震波分析研究工作. E-mail: zhuxinyun@126.com

引用格式: 朱新运, 2016. 华北盆地 Lg 波衰减及台站场地响应特征. 地球科学, 41(12): 2109–2117.

邻区表现为较显著的断陷活动,第四系在该区有广泛的分布,沉积厚度一般为 300~500 m,部分区域达 700 m(张先康等,2002;张致伟等,2015). 尽管华北盆地远离大陆活动边界带及板块俯冲带,地表变形小(沈正康等,2003),属于稳定的华北克拉通地区,但该地区构造活动强烈,地震十分活跃,破坏性强震频繁发生. 华北盆地包括京、津、唐地区,地理位置极其重要,因而一直是地震研究热点地区. 在本研究区,刘建华等(2004)利用叠加频谱比法测量华北地区平均 Lg 波尾波衰减参数,该方法通过频谱叠加削弱或消除与介质衰减无关的物理效应,而突出介质衰减. 汪素云等(2007)利用地震观测报告中卓越周期与对应的振幅关系计算了地震波衰减参数,讨论了该区域地震波衰减特征. Zhu and Chen (2012)和 Zhu(2014)研究过该区域衰减系数和场地响应,得到了可靠的研究结果,但在其计算过程中要求对所有频率数据构造同一样本矩阵,计算过程复杂,没有对解的稳定性进行检验,本研究优化了数据处理的过程,计算了衰减及场地响应参数,使用随机重采样方法评估了解的稳定性,分析了衰减及场地响应的稳定性特征.

地震波衰减研究是地震研究的重要内容,地震波衰减参数反映区域地质构造及地震活动性(Sato and Fehler, 1998; 杨捷等,2015; 马志江等,2016),计算地震波衰减参数主要包括两类方法:(1)使用地震波中的尾波成分,基于某种散射模型,通过地震波振幅对流逝时间关系获得衰减参数;(2)使用某种地震波成分(本研究采用 Lg 波),通过波谱或波谱比利用地震波对观测距离的衰减关系提取衰减参数. 归一化方法和逆向双台谱比法是计算地震波振幅随距离衰减的基本方法. 归一化方法通过对台站场地响应的简化达到研究目的,由于这种方法在台站简化过程中会引入误差,为了获得可靠的衰减参数,一般会选择良好台基条件的基岩台记录;Benz *et al.* (1997)和 Erickson *et al.* (2004)分别使用该方法对美洲大陆各区域进行衰减特征研究. 逆向双台谱比法选取 2 个台站对发生在两台站连线延长线上(或一定角度)的地震的记录,通过两次谱比消除场地对衰减参数的影响从而获得衰减参数,Chun *et al.* (1987, 2009)和 Chung *et al.* (2007)首先使用该方法研究加拿大西部区域衰减参数,之后该方法在其他区域的衰减研究中得到了应用. Zhu and Chen (2012)和 Zhu(2014)使用了基于地震波谱比的地震波衰减与场地响应联合反演方法,研究地震波衰减

特征及台站的场地响应,这种方法仍然属于第 2 类方法,该方法除了获得衰减系数之外,还可以得到台站的场地响应.

在近震范围内,Lg 波震相是非常突出的震相,Lg 波是地方震及近震记录中的地震波主体成分(Hasegawa, 1985; Kennett, 1986). Repine *et al.* (1997)的研究表明,华北盆地区域是 Lg 波的有效传播区;Lg 波常被用来研究区域地壳介质衰减参数. 本研究采用地震波衰减与场地响应联合反演方法,分频率构造样本空间,使用 Lg 波资料研究华北盆地区域地震波衰减参数及相关台站的场地响应,同时采用随机删除重构样本空间的方法评估解的稳定性.

1 研究方法

地震台站记录的地震波的频谱可以表示为(Hasegawa, 1985):

$$A(f, d) = \text{So}(f)R(f, \theta)G(d)\psi(f, d)I(f)\text{Si}(f), \quad (1)$$

式中: f 表示频率; $\text{So}(f)$ 表示震源因子项; $R(f, \theta)$ 表示震源辐射图型因子; d 表示震中距; $I(f)$ 表示仪器响应; $\text{Si}(f)$ 表示场地效应; $G(d)$ 表示几何扩散因子; $\psi(f, d)$ 表示介质衰减项. 其中,

$$G(d) = d^{-\mu}, \quad (2)$$

$$\psi(f, d) = e^{-\gamma d}, \quad (3)$$

式中: μ 是表示几何扩散特性的参数;对于 Lg 波来说, $\mu = -0.5$; γ 是 Lg 波的衰减系数,它可以被进一步表示为(Chun *et al.*, 1987; Shih *et al.*, 1994; Chung *et al.*, 2007):

$$\gamma = \frac{\pi f}{QU}, \quad (4)$$

式中: U 表示 Lg 波的群速度; Q 为地震波衰减品质因子.

假定参与运算的地震数为 m , ($k=1, 2, \dots, m$), 需要评估的台站数为 n , 两个台站(第 i 台与第 j 台, ($i, j=1, 2, 3, \dots, n$))对同一个地震(第 k 个地震)的记录谱的比可表示为:

$$\frac{A_{k,i}(f, d_{k,i})}{A_{k,j}(f, d_{k,j})} = \frac{\text{So}_k(f)R_{k,i}(f, \theta_{k,i})G(d_{k,i})\psi(f, d_{k,i})I_i(f)\text{Si}_i(f)}{\text{So}_k(f)R_{k,j}(f, \theta_{k,j})G(d_{k,j})\psi(f, d_{k,j})I_j(f)\text{Si}_j(f)}, \quad (5)$$

式中:对于同一地震,震源因子项之比可以消去;对

于震源辐射图型因子 $R(f, \theta)$, 如果震中距离与台站间距离相比很大, 以至于震源对台站之间方位角变化很小, 或者被研究波成分本身对方位不敏感, 本研究使用 Lg 波, 已有的对 Lg 波方位性特征研究成果 (Zhang *et al.*, 2002; Mitra *et al.*, 2006) 表明, Lg 对震源方位不敏感, 因而:

$$R_{k,i}(f, \theta_{k,i}) \approx R_{k,j}(f, \theta_{k,j}), \quad (6)$$

从而, 震源辐射图型因子项之比可以消去; 仪器响应 $I_i(f)$ 与 $I_j(f)$ 是已知的; $A(f, d)$ 是台站记录谱; $G(d)$ 由公式(2)给出. 将公式(3)代入公式(5)整理后可得:

$$\frac{A_{k,i}(f, d_{k,i})/[I_i(f)G(d_{k,i})]}{A_{k,j}(f, d_{k,j})/[I_j(f)G(d_{k,j})]} = \frac{Si_i(f)}{Si_j(f)} e^{-\gamma(d_{k,i}-d_{k,j})}, \quad (7)$$

对公式(7)两边取自然对数可以得:

$$\ln Y_{k,i,j}(f, \Delta_{k,i,j}) = \ln Si_{i,j}(f) - \gamma \Delta_{k,i,j}, \quad (8)$$

式中:

$$Y_{k,i,j}(f, \Delta_{k,i,j}) = \frac{A_{k,i}(f, d_{k,i})/[I_i(f)G(d_{k,i})]}{A_{k,j}(f, d_{k,j})/[I_j(f)G(d_{k,j})]}, \quad (9)$$

$$Si_{i,j}(f) = \frac{Si_i(f)}{Si_j(f)}, \quad (10)$$

$$\Delta_{k,i,j} = d_{k,i} - d_{k,j}, \quad (11)$$

令

$$a_{k,i,j} = \ln Y_{k,i,j}(f, \Delta_{k,i,j}), \quad (12)$$

$$b_{i,j}(f) = \ln Si_{i,j}(f), \quad (13)$$

则

$$a_{k,i,j}(f) = b_{i,j}(f) - \gamma(f) \cdot \Delta_{k,i,j}. \quad (14)$$

先固定第一个台为参考台站, 或称初设参考台,

$j=1$, 则:

$$a_{k,i,1}(f) = b_{i,1}(f) - \gamma(f) \cdot \Delta_{k,i,1}, \quad (15)$$

将公式(4)代入公式(15),

$$a_{k,i,1}(f) = b_{i,1}(f) - (\pi f \Delta_{k,i,1} / U) \cdot \frac{1}{Q(f)}, \quad (16)$$

令

$$c_{k,i,1}(f) = \pi f \Delta_{k,i,1} / U, \quad (17)$$

$$D \cdot m = A, \quad (18)$$

$$D = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 1 & \cdots & 1 & \cdots \\ \cdots & \cdots \\ c_{l,2,1} & \cdots & c_{k,2,1} & \cdots & c_{n,2,1} & \cdots & c_{l,i,1} & \cdots & c_{k,i,1} & \cdots & c_{n,i,1} & \cdots & c_{l,m,1} & \cdots & c_{k,m,1} & \cdots & c_{n,m,1} \end{pmatrix}^T \quad (19)$$

式中: 对于给定频率, m 是模型向量, 其元素由 $1/Q(f)$ 和 $b_{i,1}$ ($i=2, 3, 4 \cdots m$), A 是数据向量, 由 $a_{k,i,1}$, D 的最后列由 $c_{k,i,j}$ 构成, 其余元素由 1 和 0 组成.

$$m = (b_{2,1} \cdots b_{i,1} \cdots b_{m,1} \ 1/Q)^T, \quad (20)$$

$$A = (a_{1,2,1} \cdots a_{k,2,1} \cdots a_{n,2,1} \cdots a_{1,j,1} \cdots a_{k,j,1} \cdots a_{n,j,1} \cdots a_{1,m,1} \cdots a_{k,m,1} \cdots a_{n,m,1})^T. \quad (21)$$

由于速度谱是位移谱乘因子 $2\pi f$, 且以上计算是基于同一频率的比值关系, 因此可直接用速度谱代替位移谱. 解公式(18)得到衰减参数 $Q(f)$ 及 $b_{i,1}$, $b_{i,1}$ 代表场地响应对数, 参考台站对自身在不同频率下的比值均为 1, 根据公式(13)可以转换为 $Si_{i,1}(f)$.

前面提到的参考台是便于计算定义的初设参考台, 不一定具有在标准谱比法 (Borcherdt, 1970; Parolai *et al.*, 2000, 2010; Nath *et al.*, 2001) 等研究中定义参考台特性. 在标准谱比法中定义的参考台具有最小场地响应和场地响应与频率无关的特性, 实际上场地响应对频率具有强依赖性 (Tucker *et al.*, 1984; King and Tucker, 1984; Campillo *et al.*, 1985). 本研究中, 对给定频率, 在各台站场地响应比中逐一搜索最小值, 以该最小值对应的台站为该频率理想基岩场地, 该台站该频率的场地响应为 1, 把该台固定为该频率的参考台, 把其余台站对初设参考台的比转换为对该台场地响应比, 进而得到该频率不同台站的场地响应; 对所有频率执行这一过程得到各台站不同频率的场地响应及衰减参数.

2 资料及其处理

2.1 数字地震波资料的基本情况

本研究搜集 73 个台站记录资料, 由于台站仪器响应畸变和地震波记录太少等原因, 只有 68 个台站记录被使用, 台站布设仪器包括短周期、频带和宽频带地震仪, 3 分量数字采样, 本研究使用垂直分量, 采样率为 50 Hz 和 100 Hz 两种情况. 台站包括地表

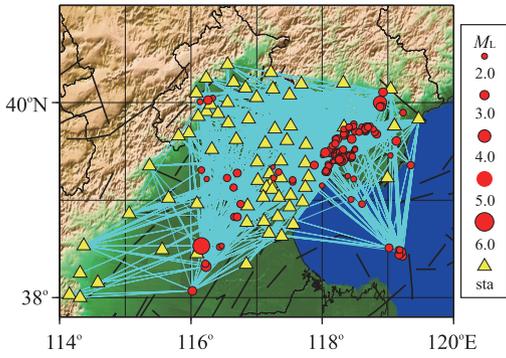


图 1 地震台、地震射线及地震分布

Fig. 1 Distribution of seismic stations, seismic ray paths and earthquakes used in this study

黄色三角形代表台站,圆圈代表地震,台站与地震间的连线代表地震射线

和第四纪黄土层中的井下台. 在 2006 年 01 月至 2008 年底记录的 149 次震级 M_L 为 1.7~5.3 的地震中,作者挑选了信噪比高的 1 000 多条波形,地震射线较好的覆盖了本研究区(图 1).

2.2 资料处理

首先对各台站记录进行直观检查,去除断记、突跳等有畸变的波形,之后使用固定速度窗方法截取 Lg 波段(朱新运和陈运泰, 2007; Zhu and Chen, 2012; Zhu, 2014),速度上限取 3.65 km/s,下界为 2.60 km/s,这一范围与 Murphy and Bennett(1982)和 Cappillo *et al.* (1985)使用的速度范围一致. 对截取得到的 Lg 波段补零至 2 的整数次方倍长,用 FFT(fast fourier transform,快速傅里叶变换)方法计算傅氏谱,同时在 P 波初动前取与 Lg 波等长数据段作为噪声水平(图 2),计算信噪比,当信噪比在研究频率范围内大于 2 时将数据作为有效数据(图 3),为提高谱数据的稳定性,对 Lg 波的傅氏谱以 3 个频率采样步长平滑 Lg 波谱(图 4).

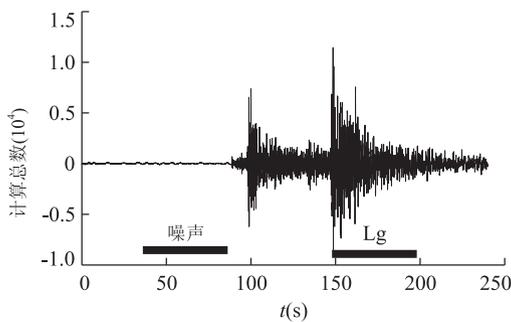


图 2 Lg 波段及噪声截取

Fig. 2 Lg wave and noise windows

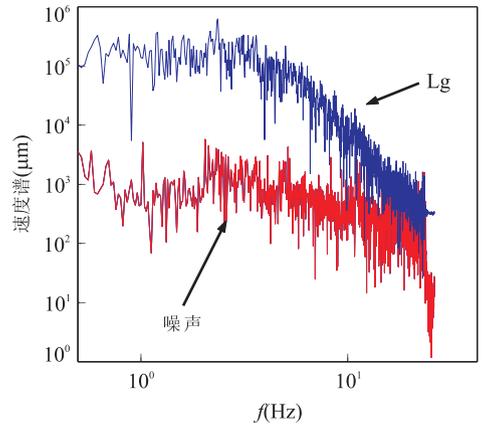


图 3 Lg 波段及噪声谱

Fig. 3 Fourier spectra corresponding to the Lg wave and noise

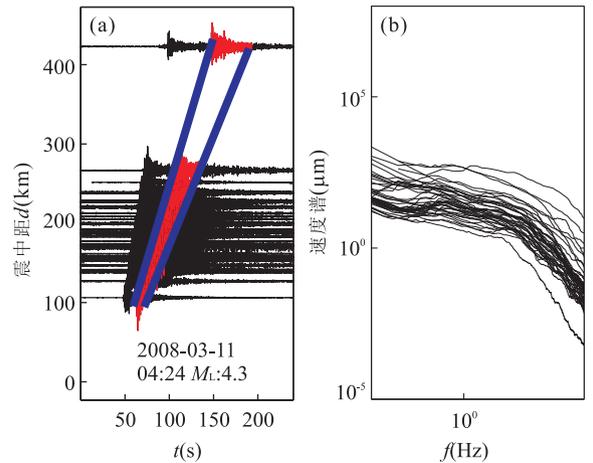


图 4 Lg 波段的截取及波谱图实例

Fig. 4 An example of Lg wave and spectra

图 a 表示以震中距远近排列的地震波,两条斜线分别代表速度的上界和下届,斜线间为 Lg 波段(波振幅进行了归一化处理);图 b 表示 Lg 波段光滑后的傅氏谱

3 解的稳定性检验

为了检验样本量与解的稳定性关系,本研究引入了随机删除样本的重构样本空间方法. 该方法是被广泛采用的统计学方法(Erickson *et al.*, 2004),假定样本总量为 n ,从总样本量中随机剔除 d 个样本,使用 $n-d$ 个剩余样本求解,重复进行 w 次,获得 w 组解,通过 w 组解求出平均解及标准偏差. 本研究中总地震样本数为 149 次($n=149$),依次取 d 等于样本总数的 0 (即无删除数据)、3%, 7%, 10%, ..., 80%,在总样本中随机删除 d 个样本,重构观测矩阵并求解,对每个 d 重复同样的过程 2 000 次,获得 2 000 组解,用这 2 000 组解得平均值、标准

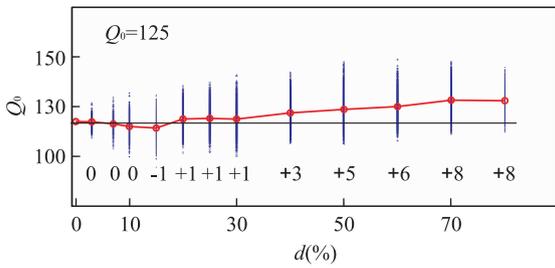


图 5 随机删除 d 个样本后产生的 Q_0 及其平均值

Fig. 5 Plot shows the average jackknife Q_0 and the actual Q_0 value versus the d of data removed from the original dataset before inverting for Q

图中标注数据为对应不同 d 的 \bar{Q}_0 对 Q_0 的偏离值

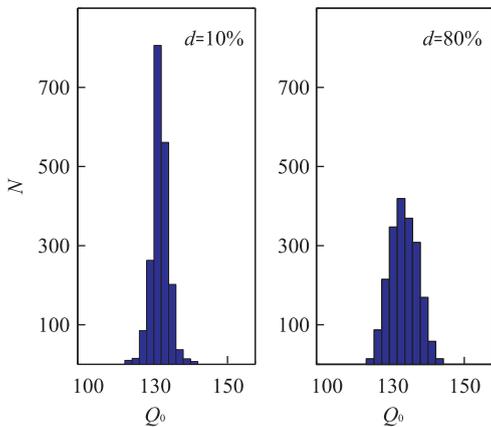


图 6 $d=10\%$ 和 $d=80\%$ 时的 Q_0 数据直方图

Fig. 6 Histograms of jackknife Q_0 corresponding to $d = 10\%$ and $d=80\%$

偏差并分析解的稳定性。

结果发现:总体上 d 越大,平均 \bar{Q}_0 对 Q_0 的偏离越大(图 6),其中 Q_0 对应 $d=0$,即使用全部样本计算的结果. 当 $d=10\%$ 时, $\bar{Q}_0 = 125$; $d=50\%$, $\bar{Q}_0 = 131$, \bar{Q}_0 对 Q_0 偏离 5%(图 5). 这说明在样本量较低的情况下,这种算法依然可以求得较为合理的解。

对 $d=10\%$ 和 $d=80\%$ 进行相同次数的重构样本组,计算 Q_0 , 并绘制 Q_0 直方图(图 6), 发现当 $d=10\%$ 时, Q_0 的范围更小, 数据更集中, 这说明删除样本量越少, 解越集中。

4 结果与讨论

4.1 衰减系数

根据前人 (Shin and Herrmann, 1987; Domínguez and Rebolgar, 1997; Raúl *et al.*, 2008; Zhu and Chen, 2012; Zhu, 2014) 研究成果, 大体在

6~7 Hz 处, Lg 波的衰减参数与对应频率的关系出现较大差异, 本研究中笔者仅计算 7 Hz 以下衰减参数, 同时, 本研究资料大部分为短周期台站资料, 尽管使用了仪器的校正环节, 但其校正也会带入一些误差, 而且经过反复计算发现, 仪器响应的非平坦段误差较大, 因而对研究的频率低端限定在 1 Hz, 即, 本研究对应频率为 1~7 Hz(图 7)。

地震样本总数 149 个, 随机删除 15 ($d=10\%$) 个地震样本计算一组解, 重复计算 2 000 次, 获得 2 000 组解, 计算 \bar{Q}_0 、 δQ_0 、 $\bar{\eta}$ 及 $\delta \eta$, 构成表达式 (22), \bar{Q}_0 、 $\bar{\eta}$ 与使用全部数据 ($d=0$) 时计算的 Q_0 、 η 结果相当。

$$Q = 125 \pm 4.4 f^{0.86 \pm 0.03} \quad (22)$$

4.2 场地响应

研究区地形地貌复杂、断裂纵横, 地表松散, 新生代沉积层的厚度差异较大, 因而区域内场地台基条件差别较大. 图 8 给出场地响应结果, 台站场地响应表现出与频率不规则关系, 总体上, 如 BBS、QIX 等基岩台站随频率升高, 场地响应变大, 而 WAK、BAD 等黄土沉积场地井下台站低频端比高频端放大明显, 部分台站在研究频率段连续上下波动, 如 XIJ 和 XOX 台, CAZ、XUS、LUT 和 ZDN 等台站场地条件良好, 在全部频率段场地响应小于 2. 仔细观察可以发现, 在场地响应波动较大的台站其标准偏差也大, 同时在同一台站高低频率处标准偏差分布也明显不同, 例如 JNX、ZDN、LUQ 等台站; 研究中笔者发现台站标准偏差与台站样本数也没有关系, 比如 SZL、XAZ 台站分别记录了 27 和 23 个地震, 样本量相当, 但标准偏差差别很大; 据此可以推断标准偏差反映了台站的不稳定属性, 是台站场地随机扰动的固有的特征. 对照台站分布及各台的场地响应还发现相距很近的台站场地放大差别也可能很

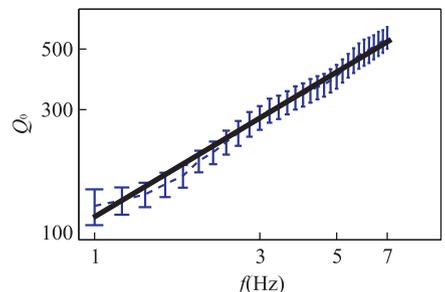


图 7 26 个频率对应的 Q 值及残差

Fig. 7 The frequency-dependent Q values at 26 frequencies and the associated error bars

黑实线代表 Q 与 f 之间的拟合关系 $Q = 125 \pm 4.4 f^{0.86 \pm 0.03}$

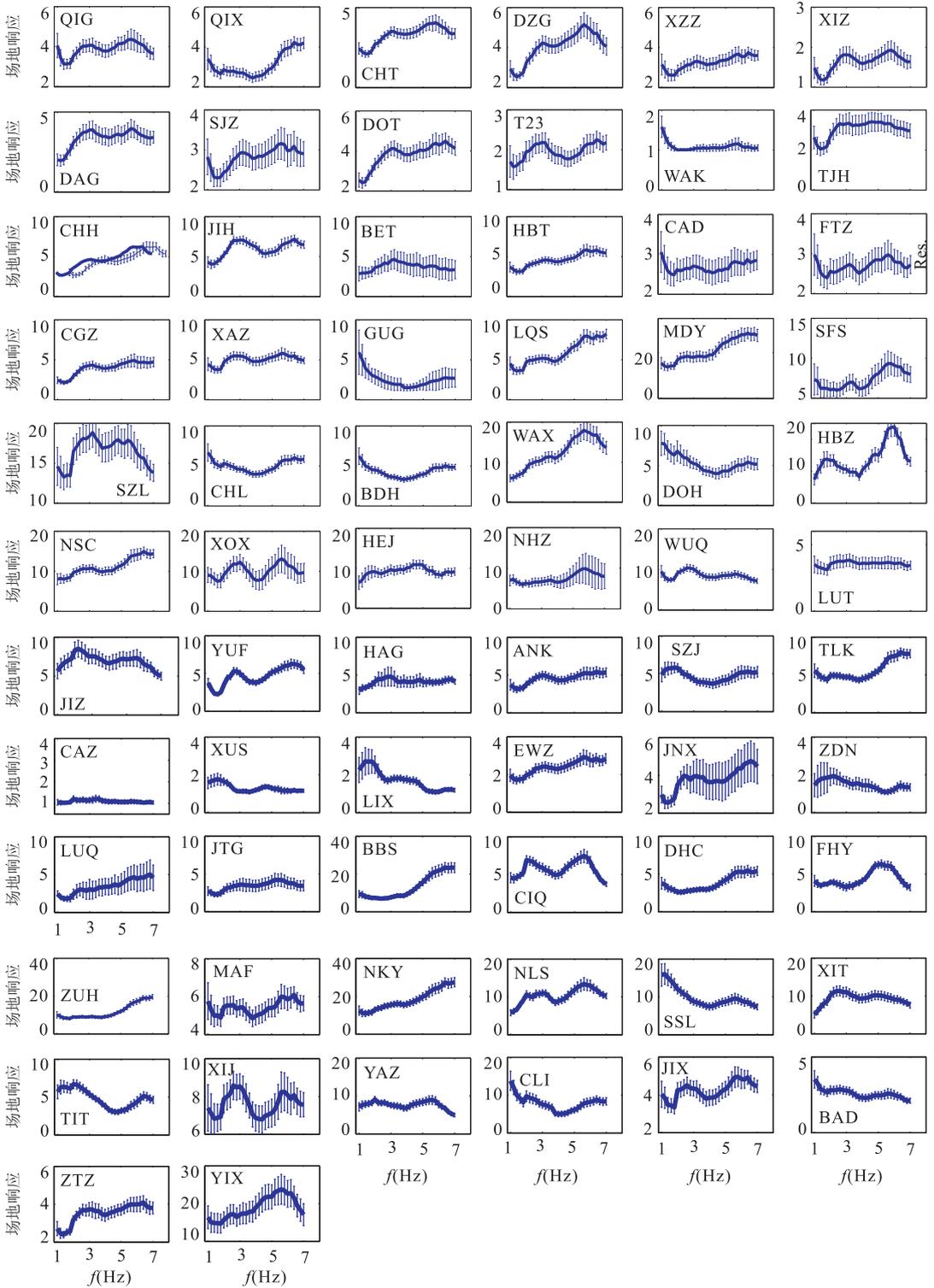


图 8 场地响应及对应的一倍标准残差

Fig. 8 Site responses with error bars obtained from the inversion, the error bars represent one standard deviation level

大,比如本研究中的 CHH 台站和 DZG 台站.

4.3 讨论

在谱比法基础上,利用路径衰减与台站震中距有关、而场地效应与震中距无关这一特点,实现衰减

参数与场地效应分离.该方法不需要假设震源模型,也不需要路径衰减简化.在资料选择上,该方法突破了逆向双台站谱比法(Chun *et al.*, 1987)对资料选择的限制,使可用资料的数量大大增加.该方法通

过最小响应比结果针对不同频率选择参考台,这样既克服了选择参考台的主观性特征,同时也考虑了场地响应对频率的依赖性特征。

华北盆地地形地貌复杂,台基条件各异,有不同岩性的基岩台和覆盖层厚度不一的土层台站,这些土层台又有不同深度的井下台等。总体上,大部分基岩台在低端放大作用小,高端响应大;土层台情况刚好相反,但也有部分台站在全部频段有上下波动。场地响应的标准偏差与场地的自身属性有关,标准偏差大的台站台基稳定性差。Zhu(2014)发现场地三分向响应不一致的台站,场地响应的标准差别也大,这说明台基的不稳定属性也表现在分向记录中。对照台站分布及各台的场地响应还发现相距很近的台站场地放大差别也可能很大,比如本研究中的 CHH 台和 DZG 台,这与前人研究结论一致(Tucker *et al.*, 1984; King and Tucker, 1984; Campillo *et al.*, 1985)。

刘建华等(2004)用叠加频谱比法对华北地区 Lg 尾波衰减进行了研究,得到区域的 Q_0 大约为 129,汪素云等(2007)利用 M_L 振幅研究该区域衰减为 Q_0 等于 294,两者虽然使用了不同的方法,其数据结果也不一样,但都认为该区域为低 Q 值高衰减区。本研究采用了谱比的衰减与场地响应联合反演方法,获得该区域 Q_0 为 125,该结果与刘建华等(2004)的研究结果一致,与汪素云等(2007)的研究结果差异较大,这种差别与各自所用方法不同有关。在地震波衰减研究中,归一化方法和逆向双台谱比法求解衰减参数是常用的计算衰减参数方法,使用归一化方法时,如果场地条件好场地响应小,归一化方法和本研究方法便完全一致;同样,逆向双台谱比法通过双向两次谱比,完全消除了场地响应,依赖于地震波振幅对距离的衰减关系,与本研究非常相似。基于此,笔者搜集了通过这两种办法获得的国内外地震活跃区和非活跃区衰减参数,并对其进行比较,本研究获得的该区域衰减参数与地震活跃的加利福尼亚州南内华达(Paul *et al.*, 1996)、墨西哥俯冲带(Dom'nguez and Rebollar, 1997)、南加州(Benz *et al.*, 1997)及加利福尼亚州北哈(Dom'nguez and Rebollar, 1997)基本相当。与地震活动程度低的法国中部地区(Campillo *et al.*, 1985)、美国 Great Basin 区域(Chávez and Priestley, 1986)、哈萨克斯坦东部(Sereno, 1990)、华东中部区域(Zhu, 2014)等相比, Q_0 明显偏低,说明本研究区属于相对高衰减,地震活动强烈区。

致谢:感谢审稿专家及编辑对文章修改提出的宝贵意见,感谢国家测震台网数据备份中心及台网中心提供的数据支持!

References

- Benz, H. M., Frankel, A., Boore, D. M., 1997. Regional Lg Attenuation for the Continental United States. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87(3):606—619.
- Borcherdt, R. D., 1970. Effects of Local Geology on Ground Motion near San Francisco Bay. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 60:29—61.
- Campillo, M., Plantet, J. L., Bouchon, M., 1985. Frequency-Dependent Attenuation in the Crust beneath Central France from Lg Waves; Data Analysis and Numerical Modeling. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75(5):1395—1411.
- Chavez, D. E., Priestley, K. F., 1986. Measurement of Frequency Dependent Lg Attenuation in the Great Basin. *Geophys. Res. Lett.*, 16(6):551—554.
- Chun, K. K., Gogdon, F. W., Richard, J. K., et al., 1987. A Novel Technique for Measuring Lg Attenuation Results from Eastern Canada between 1 to 10. *Bull. Seism. 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. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99:3021—3029.
- Chung, T. W., Noh, M. H., Kim, J. K., et al., 2007. A Study of the Regional Variation of Low-Frequency Q-1 Lg around the Korean Peninsula. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 97(6):2190—2197.
- Chung, T. W., Park, Y. K., Kang, I. B., et al., 2005. Crustal in South Korea Using the Source Pair/Receiver Pair Method. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95(2):512—520.
- Dom'nguez, T., Rebollar, C. J., 1997. Regional Variations of Seismic Attenuation from Coda and Lg Waves in Northern Baja California. *J. Geo. Res.*, 102:15259—15268.
- Erickson, D., McNamara, D. E., Benz, H., 2004. Frequency-Dependent Lg Q within the Continental United States. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94(5):1630—1643.
- Hasegawa, H. S., 1985. Attenuation of Lg Waves in the Canada Shield. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75(6):1569—1582.
- Huang, J. L., Zhao, D. P., 2005. Three Dimensional Crustal P-Wave Velocity Structure and Mechanisms of Strong Earthquake Occurrence in Capital Region. *Chinese Science Bulletin*, 50(4):348—355 (in Chinese).
- Kennett, B., 1986. Lg Waves and Structural Boundaries. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76(4):1133—1141.
- King, J. L., Tucker, B. E., 1984. Observed Variations of

- Earthquakes Motion across a Sediment-Filled Valley. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74:137—152.
- Liu, J. H., Liu, F. T., Yan, X. W., et al., 2004. A Study of Lg Coda Attenuation beneath North China: Seismic Imaging of Lg Coda Q₀. *Chinese J. Geophys.*, 47(6): 1044—1052 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z. J., Zhong, Y. Y., Han, Y. B., et al., 2016. The Tectonic Conditions of Shanxi Reservoir Induced Earthquake in Wenzhou. *Earth Science*, 41(8): 1413—1423 (in Chinese with English abstract).
- Mitra, S., Priestley, K., Gaur, V. K., et al., 2006. Frequency-Dependent Lg Attenuation in the Indian Platform. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96(6): 2449—2456.
- Murphy, J. L., Bennett, T. J., 1982. A Discrimination Analysis of Short-Period Regional Seismic Data Recorded at Tonto Forest Observatory. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72(4): 1351—1366.
- Nath, S. K., Biswas, N. N., Dravinski, M., et al., 2001. Determination of S-Wave Site Response in Anchorage, Alaska in the 1—9 Hz Frequency Band. *Pure. Appl. Geo.*, 159: 2673—2698.
- 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. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90: 286—297.
- Parolai, S., Orunbaev, S., Bindi, D., et al., 2010. Site Effects Assessment in Bishkek (Kyrgyzstan) Using Earthquake and Noise Recording Data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100(6): 3068—3082.
- Paul, A., Jongmans, D., Campillo, M., et al., 1996. Amplitude of Regional Seismic Phases in Relation to Crustal Structure of the Sierra Nevada, California. *J. Geophys. Res.*, 101: 25243—25254.
- Rapine, R. R., Ni, J. F., Hearn, T. M., 1997. Regional Wave Propagation in China and Its Surrounding Regions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87(6): 1622—1636.
- Raúl, R. C., Cristina, C., Oscar, R., et al., 2008. Seismic Attenuation in Northeastern Sonora, Mexico. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98(2): 722—732.
- Sato, H., Fehler, M. C., 1998. Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth. Springer-Verlag, New York, 308.
- Sereno, T. J., 1990. Frequency-Dependent Attenuation in Eastern Kazakhstan and Implications for Seismic Detection Thresholds in the Soviet Union. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80: 2089—2105.
- Shen, Z. K., Wang, M., Gan, W. J., et al., 2003. Contemporary Tectonic Strain Rate Field of Chinese Continent and Its Geodynamic Implications. *Earth Science Frontiers*, 10(Suppl.): 93—100 (in Chinese with English abstract).
- Shih, X. R., Chun, K. Y., Zhu, T., 1994. Attenuation of 1—6 s Lg Waves in Eurasia. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 99(B12): 23859—23874.
- Shin, T. C., Herrmann, R. B., 1987. Lg Attenuation and Source Studies Using 1982 Miramichi Data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77(2): 384—397.
- Tucker, B. E., King, J. L., Hatzfeld, D., 1984. Observations of Hard-Rock Effects. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74: 121—136.
- Wang, S. Y., Pei, S. P., Xu, Z. H., et al., 2007. Crustal S-Wave Q Estimated from M_L Amplitude I: Attenuation in Different Tectonic Regions of China. *Chinese J. Geophys.*, 50(6): 1740—1747 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Zeng, Z. X., Li, M. H., et al., 2015. The Seismo-Geological Hazards and Seismogenic Structure of the 2013 Deqing-Dehong 5.9 Earthquake. *Earth Science*, 40(10): 1701—1709 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Lay, T., Zaslav, J., et al., 2002. Source Effects on Regional Seismic Discriminant Measurements. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92(8): 2926—2945.
- Zhang, X. K., Zhao, J. R., Liu, G. H., et al., 2002. Study on Fine Crustal Structure of the Sanhe-Pinggu Earthquake (M 8.0) Region by Deep Seismic Reflection Profiling. *Earthquake Research in China*, 18(4): 326—336 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. W., Zhou, L. Q., Cheng, W. Z., et al., 2015. Focal Mechanism Solutions of Lushan M_w 6.6 Earthquake Sequence and Stress Field for Aftershock Zone. *Earth Science*, 40(10): 1710—1722 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. Y., 2014. An Inversion of Lg Attenuation and Site Response from Seismic Spectral Ratios in the Eastern China Region. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 104(3): 1389—1399.
- Zhu, X. Y., Chen, Y. T., 2007. An Inversion of Site Response and Lg Attenuation Using Lg Waveform. *Acta Seismologica Sinica*, 29(6): 569—580 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. Y., Chen, Y. T., 2012. An Inversion of Lg-Wave Attenuation and Site Response in the North China Region. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 102(6): 2600—2610.

附中文参考文献

- 黄金莉, 赵大鹏, 2005. 首都圈地区地壳三维 P 波速度细结构与强震孕育的深部构造环境. *科学通报*, 50(4):

348—355.

刘建华,刘福田,阎晓蔚,等,2004. 华北地区 Lg 尾波衰减研究 Lg 尾波 Q_0 地震成像. 地球物理学报, 47(6): 1044—1052.

马志江,钟羽云,韩用兵,等,2016. 温州珊溪水库诱发地震构造条件. 地球科学, 41(8): 1413—1423.

沈正康,王敏,甘卫军,等,2003. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究. 地学前缘, 10(特刊): 93—100.

汪素云,裴顺平,许忠淮,等,2007. 利用 M_L 振幅研究地壳横波 Q 值 I : 不同构造区的衰减特征. 地球物理学报, 50(6): 1740—1747.

杨捷,曾佐勋,李茂华,等,2015. 2013 年云南香格里拉、德钦—四川得荣交界 5.9 级地震灾害及发震构造. 地球科学, 40(10): 1701—1709.

张先康,赵金仁,刘国华,等,2002. 三河—平谷 8.0 级大震区震源细结构的深地震反射探测研究. 中国地震, 18(4): 326—336.

张致伟,周龙泉,程万正,等,2015. 芦山 M_w 6.6 地震序列的震源机制及震源区应力场. 地球科学, 40(10): 1710—1722.

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. 地震学报, 29(6): 569—580.

扬子克拉通黄陵穹隆北部发现古元古代蛇绿混杂岩

彭松柏^{1,2}, 韩庆森¹, Ali Polat^{2,3}, Timothy M. Kusky^{1,2,3}

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学全球大地构造中心, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

黄陵穹隆位于华南扬子克拉通核部地区, 出露有华南前南华纪最古老、面积最大的太古宙—古元古代崆岭杂岩(崆岭岩群)(高山和张本仁, 1990; 马大铨等, 1997; Gao *et al.*, 1999, 2011; Qiu *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2006; Jiao *et al.*, 2009; Guo *et al.*, 2014), 受后期新元古代黄陵花岗岩杂岩体侵入影响, 大体以雾渡河大断裂为界分隔为南、北部两部分(也称为南、北崆岭群), 是扬子克拉通前南华纪基底最具代表性的岩石记录, 一直受国内外地质学界的高度关注, 但对其大地构造属性和形成演化存在明显不同的认识。

新研究表明, 黄陵穹隆北部太古宙—古元古代崆岭杂岩体实际上是由 3 个不同属性和时代的岩石构造单元组成: (1) 东冲河、水月寺一带的西部微陆块, 主体为中太古代东冲河片麻状花岗杂岩体(3.00~2.95 Ga); (2) 巴山寺、交战垭、晒甲冲一带的东部微陆块, 主体为新太古代(2.7~2.6 Ga) 巴山寺片麻状花岗杂岩体(Chen *et al.*, 2013), 局部残存有古太古代 3.45~3.30 Ga 的 TTG 片麻岩(Guo *et al.*, 2014); (3) 东部微陆块与西部微陆块之间,

大致沿殷家坪—力耳坪—张家湾—覃家坪—袁家大堡—赵家阳坡—核桃园—清凉寺一线, 呈北东向带状展布主要为一套经历了古元古代(2.0~1.95 Ga) 强烈韧性变形变质的无序变沉积岩系(水月寺群变质表壳岩系), 以及呈透镜状夹于变质沉积岩系的变镁铁—超镁铁质岩岩块/岩片组成的构造蛇绿混杂岩(即水月寺蛇绿混杂岩带, Han *et al.*, 2016a)。

蛇绿混杂岩带中变沉积岩系主要为一套经历了古元古代(2.0~1.95 Ga) 角闪岩相—麻粒岩相变质和强烈构造变形的无序云母石墨片岩、云母片岩、石英岩、大理岩、条带状磁铁石英岩(BIFs)、含蓝晶石石榴黑云斜长片麻岩、石榴石斜长角闪岩、变质砂岩、变泥质岩, 夹有少量与俯冲有关的高镁安山岩—玄武岩(2.12 Ga)等(内部资料)。变沉积岩系变质程度表现出明显的高压低温和高温低压分带性, 西侧变沉积岩系中发育含蓝晶石—石榴子石的高压低温变质岩, 而东侧坦荡河—彭家河一带发育以石榴子石—夕线石组合为特征的高温麻粒岩相变质岩。

蛇绿混杂岩带中变镁铁—超镁铁质岩岩块/岩片岩石类型主要为蛇纹石化方辉橄榄岩、透闪石化

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41272242)。

作者简介: 彭松柏(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩石大地构造及蛇绿岩研究. E-mail: psongbai@aliyun.com

引用格式: 彭松柏, 韩庆森, Ali Polat, 等, 2016. 扬子克拉通黄陵穹隆北部发现古元古代蛇绿混杂岩. 地球科学, 41(12): 2117—2118.

橄榄辉石岩、变质堆晶辉石岩、斜长角闪岩(变辉绿岩、变玄武岩等)。岩石地球化学特征显示,蛇纹石化方辉橄榄岩为受俯冲流体交代 LREE 富集改造的深海残余地幔橄榄岩,透闪石化橄榄辉石岩、变质堆晶辉石岩为受俯冲流体交代和变形变质改造的堆晶超镁铁质岩。变玄武岩、变辉绿、变辉长岩属拉斑系列的玄武质岩浆岩,稀土配分平坦—略富集,无明显 Eu 异常,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,显示形成于俯冲带上(SSZ)构造环境。变镁铁—超镁铁质岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年表明,斜长角闪岩(变辉绿岩)成岩年龄为 2.14~2.15 Ga,残留岩浆锆石核部 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 5.35~10.26(平均 7.2), t_{DMI} 约为 2.24 Ga,交代变质年龄为 2.04 Ga,而蛇纹石化方辉橄榄岩中几乎都为交代变质成因锆石,变质年龄为 2.02~2.03 Ga,锆石具负 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和较老的模式年龄,反映俯冲板片携带的古老沉积物派生熔/流体对地幔楔的强烈交代变质作用(Han *et al.*, 2015)。

上述新的研究表明,黄陵穹隆北部前南华纪基底(崆岭杂岩体)是由西部中太古代东冲河微陆块(3.00~2.95 Ga)、东部新太古代巴山寺微陆块(2.7~2.6 Ga),以及两者之间呈北东向展布经历古元古代(2.00~1.95 Ga)角闪岩—麻粒岩相变质蛇绿混杂岩带(水月寺蛇绿混杂岩带)组成。黄陵穹隆北部古元古代水月寺蛇绿混杂岩的发现和识别,为扬子克拉通内前南华基底存在古元古代全球 Columbia/Nuna 超大陆聚合有关的板块俯冲—增生碰撞造山作用提供了关键地质证据。

References

Chen, K., Gao, S., Wu, Y. B., et al., 2013. 2.6–2.7 Ga Crustal Growth in Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 224: 472–490. doi:10.1016/j.precamres.2012.10.017

Gao, S., Zhang, B. R., 1990. The Discovery of Archean TTG Gneisses in Northern Yangtze Craton and Their Implications. *Earth Science*, 15(6): 675–679 (in Chinese with English abstract).

Gao, S., Ling, W. L., Qiu, Y. M., et al., 1999. Contrasting Geochemical and Sm-Nd Isotopic Compositions of Archean Metasediments from the Kongling High-Grade Terrain of the Yangtze Craton: Evidence for Cratonic Evolution and Redistribution of REE during Crustal Anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(13–14): 2071–2088. doi:10.1016/S0016-7037(99)00153-2

Gao, S., Yang, J., Zhou, L., et al., 2011. Age and Growth of the Archean Kongling Terrain, South China, with Emphasis on 3.3 Ga Granitoid Gneisses. *American Journal of Science*, 311(2): 153–182. doi:10.2475/02.2011.03

Han, Q. S., Peng, S. B., Cen, Y., et al., 2015. Discovery and Tectonic Significance of Paleoproterozoic Ophiolite from North Huangling Dome, Yangtze Craton. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(s2): 25–25. doi:10.1111/1755-6724.12308_17

Han, Q. S., Peng, S. B., Polat, A., Kusky, T. M., 2016a. A Paleoproterozoic (Orosirian) Ophiolitic Mélange, North Yangtze Craton. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90(S1): 215–216.

Guo, J. L., Gao, S., Wu, Y. B., et al., 2014. 3.45 Ga Granitic Gneisses from the Yangtze Craton, South China: Implications for Early Archean Crustal Growth. *Precambrian Research*, 242: 82–95. doi:10.1016/j.precamres.2013.12.018

Jiao, W. F., Wu, Y. B., Yang, S. H., et al., 2009. The Oldest Basement Rock in the Yangtze Craton Revealed by Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Composition. *Science in China (Series D)*, 52(9): 1393–1399. doi:10.1007/s11430-009-0135-7

Ma, D. Q., Li, Z. C., Xiao, Z. F., 1997. The Constitution, Geochronology and Geologic Evolution of the Kongling Complex, Western Hubei. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(3): 232–241 (in Chinese with English abstract).

Qiu, Y. M., Gao, S., McNaughton, N. J., et al., 2000. First Evidence of >3.2 Ga Continental Crust in the Yangtze Craton of South China and its Implications for Archean Crustal Evolution and Phanerozoic Tectonics. *Geology*, 28(1): 11–14. doi:10.1130/0091-7613(2000)028<0011:feogcc>2.3.co;2

Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2006. Zircon Isotope Evidence for ≥ 3.5 Ga Continental Crust in the Yangtze Craton of China. *Precambrian Research*, 146(1–2): 16–34. doi:10.1016/j.precamres.2006.01.002

Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2006. Widespread Archean Basement beneath the Yangtze Craton. *Geology*, 34(6): 417. doi:10.1130/G22282.1

附中中文参考文献

高山, 张本仁, 1990. 扬子地台北部太古宙 TTG 片麻岩的发现及其意义. *地球科学*, 15(6): 675–679.

马大铨, 李志昌, 肖志发, 1997. 鄂西崆岭杂岩的组成、时代及地质演化. *地球学报*, 18(3): 10–18.