

江苏省区域地表背景噪声特性的分析*

王俊, 徐戈, 孙业君

(江苏省地震局, 南京 210014)

摘要: 利用 Welch 方法, 计算了江苏省“十五”数字地震台站地表背景噪声在 0.01 ~ 20 Hz 频带范围内的功率谱值, 结果显示在周期 10 ~ 16 s、4 ~ 8 s 处分别存在两个明显的峰值。对比白天和夜晚时段台站三分向地表背景噪声的功率密度谱比值发现, 地表台站三分向背景噪声在高频段 (≥ 1 Hz) 变化最为显著, 在微震峰值频段 (0.125 ~ 1 Hz) 几乎所有台站之间的差异都不大, 低频段 (≤ 0.125 Hz) 大部分台站垂直向白天时段的噪声水平比夜晚的值低, 水平向则相反; 但井下观测系统全频段内的比值变化都很小。此外, 在 2 ~ 16 Hz 频率范围内, 沿长江的苏南—上海地区的平均噪声水平高于苏中和苏北地区, 比 NLNM (低噪声模型) 值高约 45 dB 左右; 在 0.125 ~ 1 Hz 频率范围内, 江苏中东部的噪声水平高于其他区域, 推测这可能是与区域地质构造差异有关。

关键词: 数字地震台站; 背景噪声; 功率密度谱; 江苏

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2009)02-0155-07

0 引言

地震监测台网最主要的任务是为地震监测, 地震震源机制以及地球内部结构研究提供高质量的观测数据 (杨晶琼, 杨周胜, 2005), 而地震数据的使用效能通常因为噪声的存在而大大减小, 同时由于地表噪声的存在, 使得地震计对微小信号的检测能力大大减弱 (雷栋等, 2006)。因此对噪声的理解以及定量分析是在地震数据中降低噪声水平的第一个关键步骤。

由高频 (大于 0.3 Hz) 占主导的地表噪声通常主要是人文噪声 (公路、铁路、管道等引起) 和风噪声 (Gurrola *et al.*, 1990; Uhrhammer, 2000), 在偏远的台站风噪声是高频噪声的主要噪声源 (Withers *et al.*, 1996)。地表背景噪声主要自然源包括微震、昼夜的温差和其它气压条件 (Zurn and Widmer, 1995; Beauduin *et al.*, 1996), 以及区域河流、湖泊和风等引起的波浪和流动。地表背景噪声与风暴、海浪之间的关系被很多学者广泛地研究过。Bertli (1990) 指出 Galileo Pendulum 信号记录与气压低点之间的关系, 并建议考虑沿海的海浪影响。在研究噪声早期, Longuet-Higgins (1950)

解释微震峰值 (周期 14 s 左右的高噪声值) 是海洋潮汐和海底地震波共同耦合作用的结果。压力与地震信号在地震相应频带内的相关性研究都被用于陆地和海底台站记录数据中。Crawford *et al.* (1991) 提出了用海底记录的地震数据和在加载了长周期海洋潮汐波情况下当地压力变化之间的相关性, 来研究台站下地表的构造。Zurn 以及 Widmer (1995) 和 Beauduin *et al.* (1996) 研究认为, 台站的噪声水平可以通过连续记录数据和气压数据的卷积来降低。

Eleonore (2000) 在研究 GEOSCOPE 台站噪声水平时发现, 部分台站在周期约为 7 s 处的噪声振幅和卓越周期有变化。在秋季和冬季, 噪声振幅大且卓越峰值周期向长周期方向滑动, 进一步认为这些变化是由于太平洋在秋季和冬季强烈暴风雨增加所引起的。

笔者通过对地表噪声的分析进而了解江苏省数字地震台站在 0.01 s ~ 20 Hz 频带范围内三分向背景噪声的特征, 以及江苏省区域地表噪声随区域地形变化的特性。

为了方便与标准的低和高噪声模型 (Peterson, 1993) 进行对比, 笔者利用经典的 Welch 方法, 计算了江苏省“十五”数字地震台站近两个月连

续记录的地表背景噪声速度功率谱, 及三个分向白天时段和夜晚时段背景噪声的功率密度谱比值; 并进一步以插值的方法得到以地形为函数的相对背景噪声水平图。采用的新方法可以很容易对不同台站的噪声水平进行评估。

对区域地表背景噪声的频率特性的研究是理论上评价地震台站质量的第一步; 同时, 对体波相应频段的噪声进行研究, 对于地震台站地震震级监测阈值的估计和设定以及对台站的布局都具有现实意义。

1 江苏省“十五”数字地震台网的概述

江苏省“十五”数字地震台网包括 36 个地震台站(地面台 23 个, 井下观测系统 13 个)和一个台网中心, 其中井下观测系统的平均深度在 450 m 左右(图 1)。台网孔径东西约 250 km, 南北约 450 km。台站基本均匀分布于全省, 且密度大。设备大部分采用英国 Guralp 公司的 CMG-3ESP-60 宽频带地震计以及 CMG-DM24mK3 型数据采集器, 地震计频带为 120 s ~ 40 Hz, 采样率为 100 s; 数据采集器动态范围达 120 dB, 信号全部采用 SDH 宽带传输, 个别台使用 CDMA 或 GPRS 无线网络传输。江苏省“十五”数字地震台网从 2007 年 7 月 10 日开始试运行。

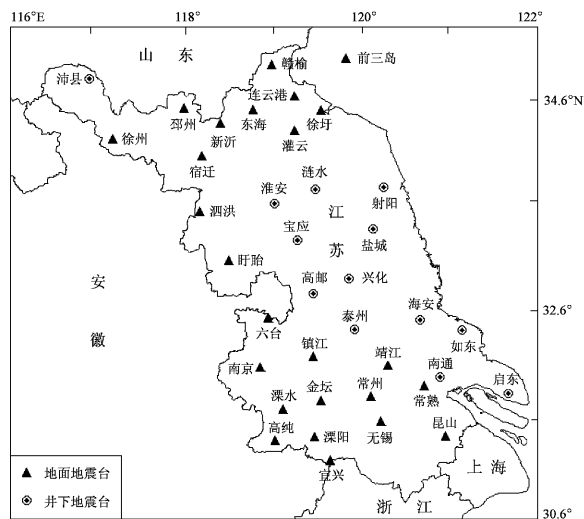


图 1 江苏省“十五”数字地震台网台站分布图

Fig. 1 The distribution of Jiangsu digital seismic stations

2 计算方法和数据处理

2.1 计算方法

随机信号只能用统计平均量来表征, 功率谱密度是描述随机信号统计规律的重要特征参量。功率谱密度的物理定义就是随机信号功率在频率上的分布密度。根据其求解的方法, 其数学定义如下:

设有限长时间系列 $x(n)$ ($0 \leq N-1$) 的傅立叶变换为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{2\pi nk}{N}}. \quad (1)$$

根据定义, 可以从离散随机信号的样本序列, 直接或间接利用傅立叶变换来估计功率谱, 这是随机信号功率谱估计的经典方法。在实际运用中, 为了提高谱估计的精度, 采用 Welch 方法, 它包括对信号重叠分段、加窗函数和 FFT 算法等, 其步骤如下:

(1) 设随机序列数据总长度为 N , 按 50% 重叠的方式共分 k 段, 每段长度为 L , 则各段的数据可以表示为

$$x_i(L) = \left[x\left(\frac{L}{2}i\right), \dots, x\left(\frac{L}{2}(i+2)\right) \right], \quad (i = 0, 1, \dots, k-1). \quad (2)$$

(2) 加窗平滑处理并计算各段频谱

$$X_i(m) = \sum_{n=0}^{L-1} [W(k) \cdot x_i(k)] e^{-j\frac{2\pi mn}{N}}. \quad (3)$$

(3) 各段周期图估计

$$S_i(m) = \frac{1}{UL} |X_i(m)|^2. \quad (4)$$

其中, $U = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} [W(n)]^2$.

(4) 求 k 段谱的平均

$$\hat{S}(m) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} S_i(m). \quad (5)$$

Welch 方法属于基于 FFT 的非参数功率谱估计方法, 其优点是直观、便于理解和计算, 对于很

长的数据记录来说,该方法的估算结果是比较理想的。为了最大程度地减小重叠后“频谱泄露”,且增加频峰的宽度,笔者将采用汉宁窗来进行平滑处理,计算背景噪声的功率谱值。

根据上述方法计算出每段噪声样本的功率谱,并在全频段内以 $1/8$ 倍频为单位间隔计算平均的功率谱。具体的方法为:在短拐角周期(高频) T_s 和长拐角周期 $T_L = 2 * T_s$ 内的平均功率谱值,赋给几何中心周期 $T_c (T_c = \text{sqct}(T_s * T_L))$,随后 T_s 按 $1/8$ 倍频增加,直至到达所需的频率,本文计算的频带宽度为 $0.01 \sim 20 \text{ Hz}$ 。

2.2 数据的处理

目前在绝大多数噪声的研究中,观测系统的瞬态变化、仪器的毛刺(如数据记录间跃、限幅、尖峰、脉冲标定)等信号都会被去除。而在本文的数据处理中,使用 Daniel 和 Raymond (2004) 提出的功率谱中密度概率函数方法。该方法认为上述信号出现的概率相对纯粹的背景噪声是小概率,计算中的连续波形数据可以不全是纯粹的背景噪声,因此上述信号也将被包含在里面,从而可以更科学地评估台站的噪声特性。

为了让计算结果能够客观地反映出江苏省“十五”数字地震台站真实的地表背景噪声水平,笔者选择了2007年7~8月近两个月的连续记录数据作为计算的样本。同时为了消除连续噪声数据波形中地震信号的影响,在选择计算样本的过程中遵循以下原则:(1)在距台站震中距小于 70° 范围内,24小时未发生 $M_b \geq 6.0$ 地震;(2)在距台站震中距约小于 20° 范围内,12小时未发生 $M_b \geq 5.0$ 地震;(3)在距台站震中距约小于 15° 范围内,3小时未发生 $M_b \geq 4.0$ 地震;(4)分别取 $11:00 \sim 14:00$ 和 $23:00 \sim 02:00$ 作为白天时段和夜晚时段。随后将截取出来的连续记录数据做去零漂等必要的预处理,利用上述计算方法,计算出每条样本的功率谱值,最后按台站和时段进行平均,即可得到所需要的每个台的功率谱值。

3 噪声的特性

宽频带仪器能让我们了解到频带周期从数千秒到数十赫兹的地表噪声特征。在地表短周期噪声(周期小于 1 s)主要是由人类活动引起的人文

噪声,如交通干道(公路、铁路、管道等)等引起;高频(周期大于 0.3 Hz)(Rodgers *et al*, 1987; Given, 1990)占主导的地表噪声通常还包括风噪声,风沿着地形不规则的扰动以及树在地面摇动通过根部作用都会产生高频噪声;风作用在高塔、通讯塔等大型建设物上会产生长周期噪声。

人文噪声作为面波在传播过程中很快就会衰减完,因此可以通过深井、隧道及山洞观测来大大减小人文噪声。人文噪声显示出很强的白天和夜晚变化的特征,但其频率特征则主要依赖于与干扰源的距离。如图2所示:卡车在离测点 20 m 远的地方经过可产生 $5 \sim 10 \text{ Hz}$ 左右的噪声干扰,比安静时记录的功率谱值要高 $30 \sim 35 \text{ dB}$ 左右。

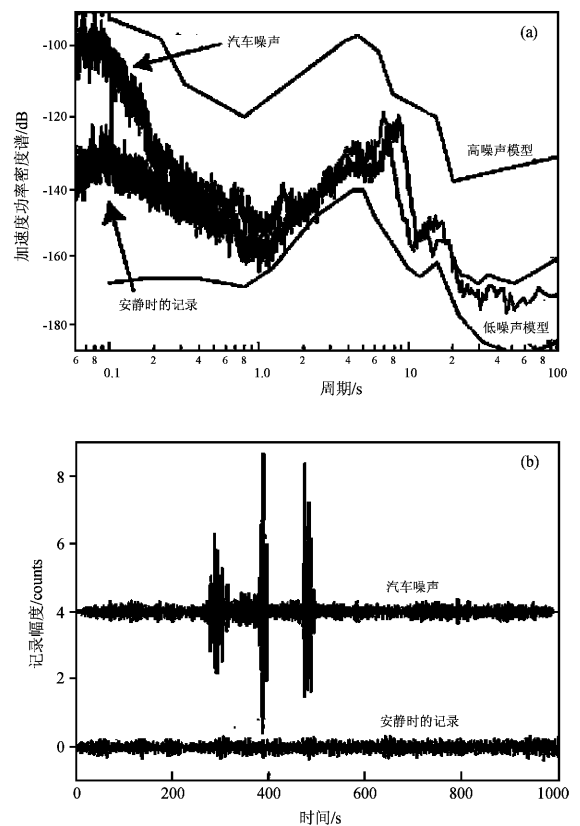


图2 卡车噪声,背景噪声的功率谱(a)和记录的时间序列(b)

Fig. 2 The PSD cures of car traffic noise (a) and background noise, and their time series (b)

由江苏省宽频带数字地震台垂直向背景噪声的功率谱曲线(图3)可以看出,在微震峰值频带为 $0.1 \sim 1 \text{ Hz}$ 内,曲线有两个明显的峰值:一是具有小振幅、长周期($T \approx 10 \sim 16 \text{ s}$)特性的“单频峰”,它是由于浅层地壳的海浪能量转化为地震能

量而引起的垂直向压力的变化或者直接作用在海岸上所致 (Hasselmann, 1963); 二是具有大振幅, 短周期 ($T \approx 4 \sim 8$ s) 特性的“双频峰”, 它是由于等周期的海洋潮汐波沿反方向传播叠加而产生的持续固定的半周期重力波而引起的 (Longuet-Higgins, 1950)。

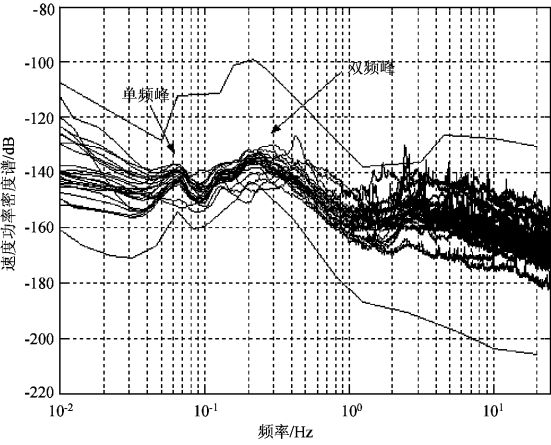


图3 江苏省宽频带数字地震台垂直向背景噪声的功率谱曲线

Fig. 3 The PSD cures of vertical component background noise of Jiangsu digital seismic stations

4 计算结果和分析

4.1 江苏省“十五”数字地震台站的背景噪声功率谱

江苏省“十五”数字地震台站有部分是井下观测, 因此更有必要来了解其地震背景噪声的特性。为了能更全面地分析台站的噪声水平, 笔者根据上述方法分时段计算了近两个月台站三分向背景噪声功率谱值的背景噪声功率谱值 (图4)。图中台站序号和台站名的对应关系如下: 1-CS, 2-CZ, 3-DH, 4-GAY, 5-GC, 6-GUY, 7-HA #, 8-HUA #, 9-JJ, 10-JT, 11-KS, 12-LAS #, 13-LH, 14-LIS, 15-LYG, 16-LY, 17-NT #, 18-PX #, 19-PZ, 20-RD #, 21-SH, 22-SQ, 23-WX, 24-XIY, 25-XW, 26-XY, 27-XZ, 28-YX, 29-ZJ, 30-PK, 31-XH#, 其中#号表示井下观测系统。由图4可以直观地了解到江苏省“十五”数字地震台站三分向白天时段和夜晚时段的差异。

(1) 垂直向: 除了兴化台 (XH), 在高频 (1

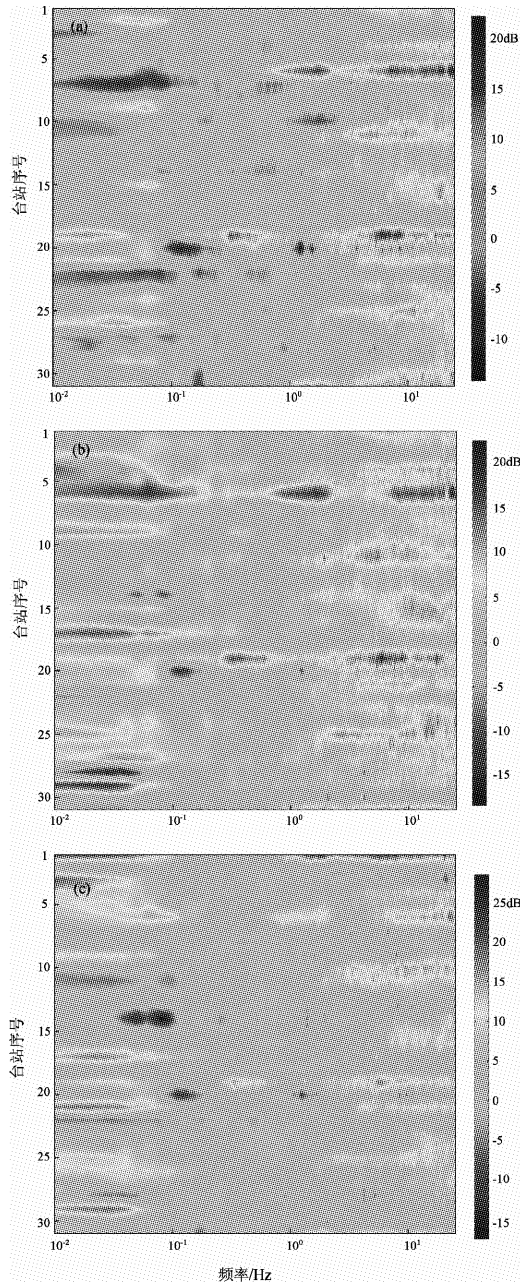


图4 江苏省“十五”数字地震台站三分向白天时段 (11:00 ~ 14:00 时) 和夜晚时段 (23:00 ~ 02:00 时) 背景噪声功率谱比值图

Fig. 4 The ratio of PSD between daytime (11:00 ~ 14:00) and night time (23:00 ~ 02:00) noises for three components (UD、NS、EW) at Jiangsu digital seismic stations.

(a) UD 向; (b) NS 向; (c) EW 向

~ 10 Hz) 具有明显的变化外, 其余 6 个井下观测系统在全频带内的差异均很小 (0 ~ 5 dB), 这说明深井观测可以有效地屏蔽人文噪声以及长周期噪声; 对于大部分地表台站来说, 在 3 ~ 16 Hz 频

带内白天时段的噪声水平明显比夜晚时段的噪声水平高，这个频段的噪声主要是由人文噪声源所引起的。如灌云台（GUY）位于灌云县城大伊山风景区；邳州台（PZ）东侧紧邻居民住宅，且观测点200 m外有一条公路；连云港台（LYG）位于连云港市花果山风景区内，台基为花岗片麻岩且周围有大量的树木，树在地面的摇动通过其根部作用会产生高频10 Hz左右的噪声；昆山台（KS）位于昆山市玉山公园内。在微震峰值频段（0.125~1 Hz），几乎所有台站之间的差异都不大。在低频段大部分台站白天的噪声水平比夜晚要低。

（2）水平向：最大差值最高达25 dB，大部分台站在高频段和微震频段的变化呈现出与垂直方向相似的特征；而在低频段大部分地表台站则是白天时段的噪声水平高于夜晚时段，这可能是由于风速的变化、气压和温度之间差异所引起的（Bulter, Hutt, 1992）。

4.2 江苏省区域背景噪声特性

经过“十五”项目建设后，江苏省数字地震台站的布局更加合理，台站的密度也较高。基于上述计算结果，可以进一步分析江苏省区域地震背景噪声的特性。我们分别在两个独立的频带范围2~16 Hz、0.125~1 Hz将各台的计算结果与NLNM值相比，随后将差值在0.05°×0.05°的网格进行插值，就得到以地形为函数的背景噪声水平图（图5）。为了使计算区域能更好地覆盖江苏省，我们还使用了与江苏相邻的浙江萧山和临安，安徽泾县、舒城和蒙城，以及山东青岛、沂水和凉山，上海大洋山等台站的记录数据。

由图5可见，背景噪声水平随地形变化最强的是周期小于1 s的噪声，这个周期是人文噪声卓越周期。如图5a所示，噪声水平最高的区域在江苏南部（镇江—常熟—无锡—苏州—昆山—上海），噪声水平比NLNM值最高达55 dB，均值在45 dB左右，这一带是我国经济和工业发达地区，人口稠密，这一特征与Daniel和Raymond（2004）对美国东海岸的计算结果，比NLNM值高50 dB相似。相对于苏南地区的高值，在太湖区域出现了一个低值区，比NLNM值高35 dB左右。江苏中部和北部地区在这频段内噪声水平要比江苏南部低，比NLNM值高35~40 dB左右。变化值最低的区域几乎都在江苏西部与安徽交界的经济不发达地区。但是由于周边的台站分布相对较稀，因此边界以

外计算结果的可信度相对要低一些。

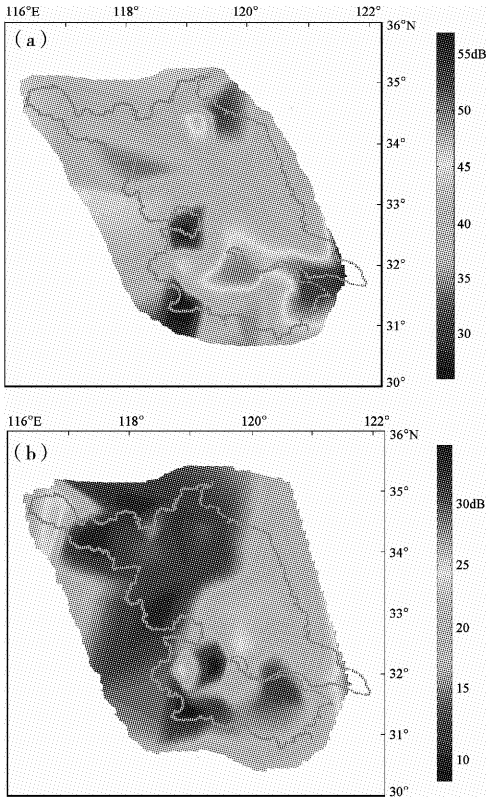


图5 江苏省区域背景噪声在2~16 Hz（a）和0.125~1 Hz（b）频段内高于NLNM值图
Fig.5 The background noise PSD Value above NLNM on the continental fnequency ranges in 2~16 HZ（a）and 0.125~1 HZ（b）in Jjansgu

图5b显示，在微震周期内江苏中东部地区的噪声水平要高于远离海岸的西北部内陆区域，比NLNM值高20~25 dB，这可能与区域的地质条件相关。江苏中东部地区属于扬子地台的东南角，是海陆相接的过渡区，区内新生界地层主要有第四系松散层和上第三系泥砂层，地层覆盖厚，因此，更容易受到海洋潮汐的影响。西北部属于中朝和扬子两个陆块的结合部，且中间还夹着苏鲁地块，陆块之间还存在碰撞的造山带（徐嘉伟，1980；张文佑等，1986）。

5 结论与讨论

（1）由图3的计算结果分析，几乎所有的台站的噪声功率谱曲线基本上都展布在NLNM和NHNM之间，处于一个合理的噪声水平，且可以明显观测到有两个“峰值”。

(2) 从图 4 的计算结果分析, 垂直分向: 地表台站在高频段 (> 1.0 Hz) 由于人文噪声占主导, 白天时段的功率谱都要高于夜晚时段; 在低频段白天时段的噪声水平比夜晚时段的值低; 在微震峰值频段 ($0.125 \sim 1$ Hz), 几乎所有站点之间的差异都不大。水平向: 在高频段和微震频段大部分台站的变化呈现出与垂直向相似的特征; 在低频段大部分地表台站白天时段的噪声水平也比夜晚时段的高。对于井下观测系统来说, 全频段白天和夜晚时段的噪声水平变化都很小, 均在 $0 \sim 5$ dB 之间。

(3) 对于噪声水平随地形的变化笔者在本文中做了一定的探索。通过将背景噪声功率谱值分为两个独立的周期范围来分析江苏省区域的背景噪声水平, 我们发现: 在 $2 \sim 16$ Hz 频段内, 相对于 *NLNM* 值江苏南部的噪声水平比中部和北部高, 主要是由于经济和工业发达、人口稠密造成的人文噪声引起; 在 $0.125 \sim 1$ Hz 频段内, 中东部区域的噪声水平高于其它地方, 这可能是由区域地质条件差异所引起的。

参考文献:

- 雷栋, 胡祥云, 张素芳. 2006. 小波理论及其在地震监测中的应用 [J]. 地震研究, 29 (1): 103–107.
- 万永革. 2007. 数字信号处理的 MATLAB 实现 [M]. 北京: 科学出版社.
- 徐嘉伟. 1980. 郯庐断裂带的平移运动及其地质意义 [C] // 国际交流地质学术论文集. 北京: 地质出版社.
- 杨晶琼, 杨周胜. 2005. 云南地震数字遥测台网子台地动噪声分析 [J]. 地震研究, 28 (1): 86–89.
- 张文佑, 李阴愧, 张弛, 等. 1986. 中国及邻区海陆构造 [M]. 北京: 科学出版社.
- Beauduin P P, Lognonne J, Montagner P, *et al.* 1996. The effects of at-

- mospheric pressure changes on seismic signals, or how to improve the quality of a station [J]. BSSA, 86 (5): 1760–1799.
- Bernard P. 1990. Historical sketch of microseisms from past to future [J]. Earth planet interiors, 63 (1): 145–150.
- Butler R, Hutt C R. 1992. Seismic noise on Rarotonga surface versus downhole [J]. EOS, 73: 548–549.
- Daniel E M, Raymond P B. 2004. Ambient noise levels in the continental United States [J]. BSSA, 94 (4): 1517–1527.
- Eleonore S. 2000. Genevieve roult and lucianna astiz, GEOSCOPE station noise levels [J]. BSSA, 90 (3): 690–701.
- Given H K. 1990. Variations in broadband seismic noise at IRIS/IDA stations in the USSR with implications for event detection [J]. BSSA, 80 (5): 2072–2088.
- Grawford W C, Webb S C, Hildebrand J A. 1991. Seafloor compliance observed by long period pressure and displacement measurement [J]. J G R, 96: 16151–16160.
- Gurrola H J, Minster H Given H, *et al.* 1990. Analysis of high frequency seismic noise in the western United States and eastern Kazakhstan [J]. BSSA, 80 (3): 951–970.
- Hasselmann K. 1963. A statistical analysis of the generation of microseisms [J]. Rev Geophys, 1: 177–209.
- Longuet-Higgins M S. 1950. A theory of the origin of microseisms [R]. Phil Trans Surv Tech Rept. 243: 1–35.
- Peterson J. 1993. Observations and modeling of background seismic noise [R]. U. S. Geol. Surv. Tech. Rept: 93–322, 1–95.
- Rodgers P W, Taylor S R, Nakanishi K K. 1987. System and site noise in the regional seismic test network from 0.1 to 20 Hz [J]. BSSA, 7 (2): 663–687.
- Uhrhammer R A. 2000. Background noise PSD analysis of USNSN broadband data for 1998 [R]. Berkeley Seismological Laboratory report.
- Withers M M, Aster R C, Yong C J, *et al.* 1996. High frequency analysis of seismic background noise as a function of wind speed and shallow depth [J]. BSSA, 86 (4): 1507–1515.
- Zurn W, Widmer R. 1995. On noise reduction in vertical seismic records below 2 mHz using local barometric pressure [J]. GRL, 22: 3537–3540.

Analysis on Background Seismic Noise Characteristics in Jiangsu Province

WANG Jun, XU Ge, SUN Ye-jun

(*Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 250014, Jiangsu China*)

Abstract

In this paper, we adopted the Welch's method to estimate background noise velocity power spectral density (PSD) of the seismic stations in Jiangsu province at the range from 0.01s to 20Hz. We found that there are two dominant peaks at the periods $T \approx 10 - 16$ s、 $T \approx 4 - 8$ s respectively. And the day/night spectral ratios of surface seismic stations show that the strongest variation for three components is at the frequency range ≥ 1 Hz, the ratio variations at the 0.125 - 1 Hz are not distinguished, and the day noise level of the vertical component are lower than the night time noise at the range of low frequency range (≤ 0.125 Hz), the horizontal components are reverse. At the same time, there is little change for day/night spectral ratios of boreholes stations at all frequency sections. In additional, we also discussed seismic noise characteristic on the terrain difference of Jiangsu, the results show that the southern Jiangsu - Shanghai region has significantly higher noise level than mid-northern at the high frequency range (2 - 16 Hz), which is about 45 dB higher than the NLNM. At 0.125 - 1 Hz, the mid-eastern region has higher noise than other region, these are considered to be caused by geological difference.

Key words: digital seismic station; background seismic noise; power spectral density; Jiangsu Province