

荆涛, 孙艺, 崔政东. 辽宁地区低频背景噪声特征分析及模型建立[J]. 华南地震, 2023, 43(1): 61-69. [JING Tao, SUN Yi, CUI Zhengdong. Characteristic Analysis and Model Establishment of Low Frequency Background Noise in Liaoning Area [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(1): 61-69]

## 辽宁地区低频背景噪声特征分析及模型建立

荆涛<sup>1</sup>, 孙艺<sup>2</sup>, 崔政东<sup>1</sup>

(1. 沈阳地震监测中心站, 沈阳 110061; 2. 辽宁省地震局, 沈阳 110034)

**摘要:** 低频背景噪声是地震数据的重要组成部分, 在地下介质成像和地质构造探测等研究中发挥重要作用。区域性背景噪声研究不仅会得出该区域背景噪声特性, 还可以针对地域性特征进行更适用的应用。辽宁地区低频背景噪声对本区域背景噪声研究有重要意义, 基于辽宁省6个台站连续多年的宽频带地震背景噪声数据, 利用地震计观测的位移值研究辽宁地区低频背景噪声特征, 并采用数学函数模型构建了辽宁地区低频背景噪声模型。通过计算背景噪声位移分析发现, 辽宁地区低频背景噪声(1 Hz以下)具有明显季节性变化, 通常在冬季达到最大值, 在夏季达到最小值。基于三角函数关系拟合得到辽宁地区背景噪声年变公式, 建立辽宁地区低频背景噪声模型, 并采用ADF法验证了该模型可靠性。

**关键词:** 低频背景噪声; 模型建立; 特征分析

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)01-0061-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.01.08

## Characteristic Analysis and Model Establishment of Low Frequency Background Noise in Liaoning Area

JING Tao<sup>1</sup>, SUN Yi<sup>2</sup>, CUI Zhengdong<sup>1</sup>

(1. Shenyang Earthquake Monitoring Central Station, Shenyang 11006, China;

2. Liaoning Earthquake Agency, Shenyang 110034, China)

**Abstract:** Low-frequency background noise is an important part of seismic data and plays an important role in the research of subsurface media imaging and geological structure detection. Regional background noise research can not only obtain the background noise characteristics of the region, but also make more suitable applications for regional characteristics. The low-frequency background noise in Liaoning is of great significance to the study of background noise in this region. Based on the broadband seismic background noise data of six stations in Liaoning Province for many years, the characteristics of low-frequency background noise in Liaoning area are studied by using the displacement values observed by seismometers, and the low-frequency background noise model in Liaoning area is constructed by mathematical function model. Through calculating and analyzing the displacement generated by the background noise, it is found that the low-frequency background noise (below 1 Hz) in Liaoning has

收稿日期: 2022-05-10

基金项目: 中国地震局地震监测、预测、科研三结合(3JH-202201071)

作者简介: 荆涛(1985-), 男, 高级工程师, 主要从事地震监测与研究工作。

E-mail: 407447341@qq.com。

obvious seasonal changes, usually reaching the maximum value in winter and the minimum value in summer. Based on the fitting of trigonometric functions, the annual variation formula of background noise in Liaoning area is obtained, and a low-frequency background noise model in Liaoning area is established, and its reliability is verified by ADF method.

**Keywords:** Low frequency background noise; Model establishment; Feature analysis

0 前言

地震背景噪声在地下深部结构成像、工程场地动力特性评价、地球物理勘查和地震预测预报等方向有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。其中,高频地震背景噪声(1 Hz 以上)主要源自人类的生产生活,这些活动均具有一定规律性,而低频地震背景噪声(1 Hz 以下)则被很多学者认为主要源自海洋波浪与固体地球相互作用所激发的瑞利波和体波,其异常变化主要来自海洋气象事件<sup>[2, 4]</sup>,也有学者认为地壳的构造运动也可引起低频地震背景噪声的异常变化<sup>[5-6]</sup>。

国内研究低频背景噪声的时频特征时,较多学者利用几个月或更短时段地震背景噪声数据探查低频背景噪声来源以及突发自然事件引起的中

短期变化,但基于多年连续观测数据的长时段时频特征研究尚不多见。本文搜集整理了2013年至2018年期间,辽宁省6个固定台站(台站信息见表1)的宽频带地震波形数据,对低频地震背景噪声进行长时段研究分析,考虑到水平分量较垂直分量更易受温度扰动和大气压变化产生的地倾斜的影响<sup>[4]</sup>,所以本文选择了垂直向波形资料用以处理和分析。以此来观察低频地震背景噪声长时段的时域及频域特征,其次,应用最小二乘法建立辽宁地区低频背景噪声参考模型,给出辽宁地区低频背景噪声年变公式,利用ADF(Augmented Dickey-Fuller)<sup>[7-8]</sup>检验该模型的平稳性,对所建立的模型进行可行性分析,最终评估该背景噪声模型的可靠性。对区域背景噪声的特性进行深入了解,才能更好的选择背景噪声的应用。

表1 台站信息表  
Table 1 Station information table

台站	仪器型号	数据采集器型号	频带范围	系统灵敏度/(count·s·m <sup>-1</sup> )
SNY	JCZ-1T	EDAS-24IP	360 s ~ 50 Hz	1258 E6
DL2	CTS-1E	EDAS-24IP	120 s ~ 50 Hz	1258E6
CHY	CTS-1E	EDAS-24IP	120 s ~ 50 Hz	1258 E6
DDO	CTS-1E	EDAS-24IP	120 s ~ 50 Hz	1258 E6
YKO	CTS-1E	EDAS-24IP	120 s ~ 50 Hz	1258 E6
TIL	BBVS-60	EDAS-24IP	60 s ~ 50 Hz	1258 E6

1 数据及方法

为了更科学、更严谨地对背景噪声进行对比分析研究,也考虑了资料选择时间和台站仪器分布。第一,对资料选取时间范围尽可能选取较长时段,经筛选后发现有的台站在某一时段或某年仪器运行不稳定、数据观测质量不符合本课题研究标准、仪器安装架设时间的先后等因素,确定资料选取时间为2013年1月1日至2018年12月31日;第二,需考虑数据产出台站的地理方位性,尽可能均匀分布在辽宁地区,最终确定了沈阳台(SNY)、大连台

(DL2)、营口台(YKO)、丹东台(DDO)、朝阳台(CHY)、铁岭台(TIL)(图1),所选取6个台站较好地覆盖了辽宁地区,该地区按构造单元分为:辽东隆起区、下辽河断陷区和辽西隆起区,其中大连台、丹东台、铁岭台位于辽东隆起区;朝阳台位于辽西隆起区;营口台位于下辽河断陷区,以及沈阳台位于辽东隆起一下辽河断陷交界地区。

由于有些台站的数据存在零点漂移干扰,这是由人为干扰或仪器自身观测原理等因素导致,对背景噪声的提取没有价值,同时为了增加数据分析的严谨性,对其真实观测的物理量进行研究,对源数据进行去除仪器响应处理。根据Obspy提供的去零

漂及去除仪器响应方法对背景噪声进行预处理(图2)。首先利用Obspy提供的merge方法将数据波形导入到Stream对象中,接着采用slice方法对数据进行切片,固定取出每日03时(若遇地震、人为等干扰统一更换为其它平静时段)的波形数据;应用detrend方法对数据进行去零漂处理,在linux环境下利用IRIS提供的rdseed软件读取SEED格式

波形数据,输出RESP格式的仪器响应文件,利用remove\_response进行反卷积操作,以达到去除仪器响应的效果,进而得到观测的速度值;最后将预处理数据作为快速傅里叶变换的信号输入,采样率为100 Hz,将不同分析频段的当日最大幅值选为相应频段的每日位移值,画出各台年度位移曲线,以供研究分析。

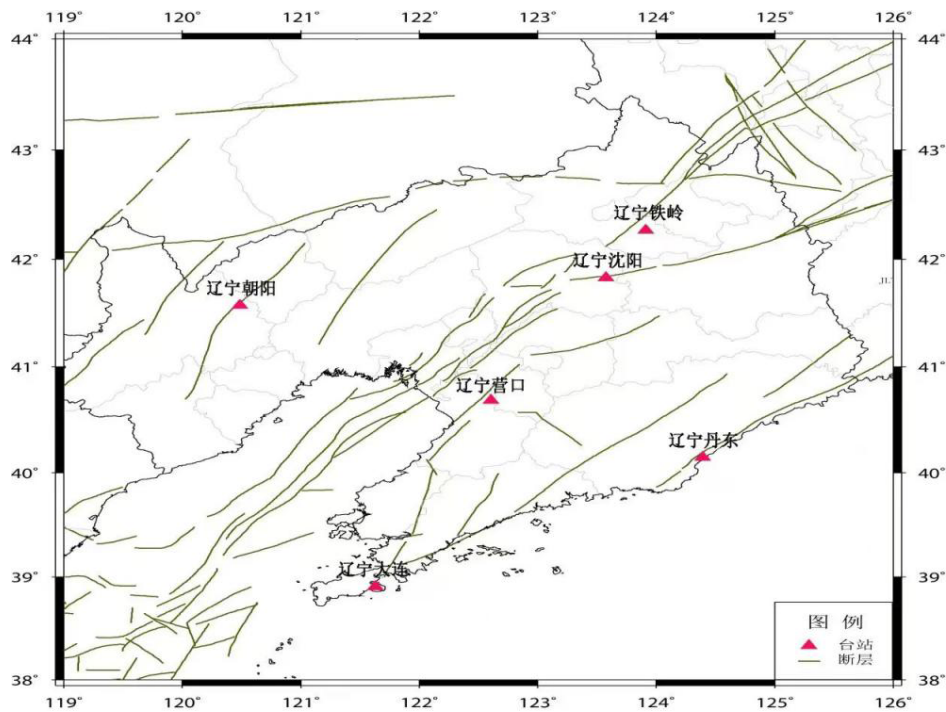


图1 所选取辽宁省地震台站分布图

Fig.1 Distribution map of selected seismic stations in Liaoning Province

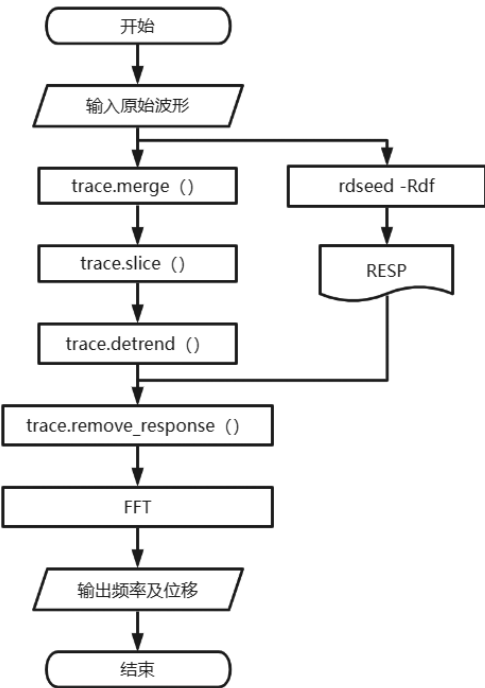


图2 去除零漂及仪器响应流程图

Fig.2 Flow chart of zero drift removal and instrument response

## 2 辽宁地区背景噪声特征分析

研究结果显示 0.1 ~ 1.0 Hz 频段内, 辽宁地区 6 个台站背景噪声具有较好的年变特征(图 3), 周期性较为规律, 粗略来看周期约为 1 年, 整体曲线形态类似于“固体潮汐”, 存在明显季节性特征, 呈现“冬高夏低”的特征。这一现象与国内很多研究成果相符, 研究频段内正属于海浪第二周期, 主要受北太平洋秋季风暴增强所导致<sup>[9]</sup>, 从另一方面讲, 也证实了数据的准确性。随着研究频段不断升高, 各台站位移值水平逐渐减小。在低频段中位移值较大, 其中 0.1 ~ 0.2 Hz 频段内位移值峰值可达 0.0025  $\mu\text{m}$  左右, 而在 0.9 ~ 1.0 Hz 频段内, 位移值峰值只有 0.001  $\mu\text{m}$  左右。

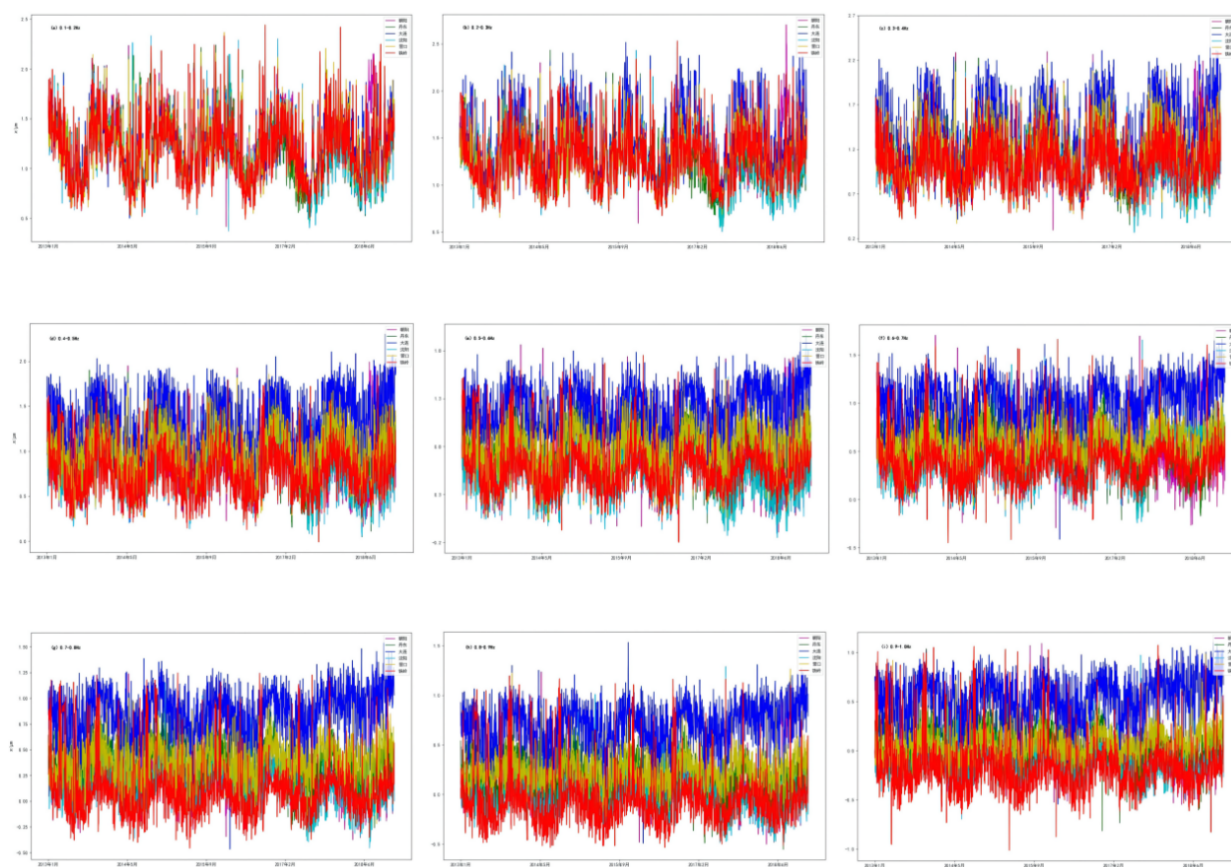
以营口台(YKO)为例, 通过观察 9 个不同频段的位移值分布, 发现各频段的位移分布均呈成偏态分布, 偏态分布不利于数据统计分析。因此将

各个频段位移取对数处理, 取对数处理后各频段信号近似呈正态分布(图 4), 其余台站数据同样采用取对数处理, 特征仍一致。

通过观察各频段的时域特征, 发现各地区数据具有良好的周期性(图 5), 周期约为一年左右, 不过存在少量高频信号, 会干扰长时段的观察分析, 特将时间位移图进行中值滤波后, 信号周期性更为显著(图 6), 这对于后续分析研究带来方便。

## 3 背景噪声模型建立

区域背景噪声模型的建立, 不仅能够描述该区域背景噪声基本特征, 也可作为本地区背景噪声研究的基础性资料。若经过多年数据积累, 不断修正区域噪声模型, 使之更接近“正确”, 该区域背景噪声若出现“异常”变化, 对日常分析预报工作有一定的“前兆”指示意义, 同样也可为



(a) 0.1 ~ 0.2 Hz 各台位移值年度曲线; (b) 0.2 ~ 0.3 Hz 各台位移值年度曲线; (c) 0.3 ~ 0.4 Hz 各台位移值年度曲线; (d) 0.4 ~ 0.5 Hz 各台位移值年度曲线; (e) 0.5 ~ 0.6 Hz 各台位移值年度曲线; (f) 0.6 ~ 0.7 Hz 各台位移值年度曲线; (g) 0.7 ~ 0.8 Hz 各台位移值年度曲线; (h) 0.8 ~ 0.9 Hz 各台位移值年度曲线; (i) 0.9 ~ 1.0 Hz 各台位移值年度曲线

图3 各台站不同频段位移值年变曲线

Fig.3 The annual variation curve of the displacement value of each station in different frequency bands



日后噪声分析研究中有效去除背景噪声影响,使研究更趋于“真实”的噪声变化。

通过上述观察分析,对于辽宁地区背景噪声可采用三角函数形式的模型:

$$\log Y = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} x\right) + B \quad (1)$$

式(1)中:  $T=365$ ,  $A$ 、 $B$ 是待拟合的参数,  $Y$ 是频段内的位移值。

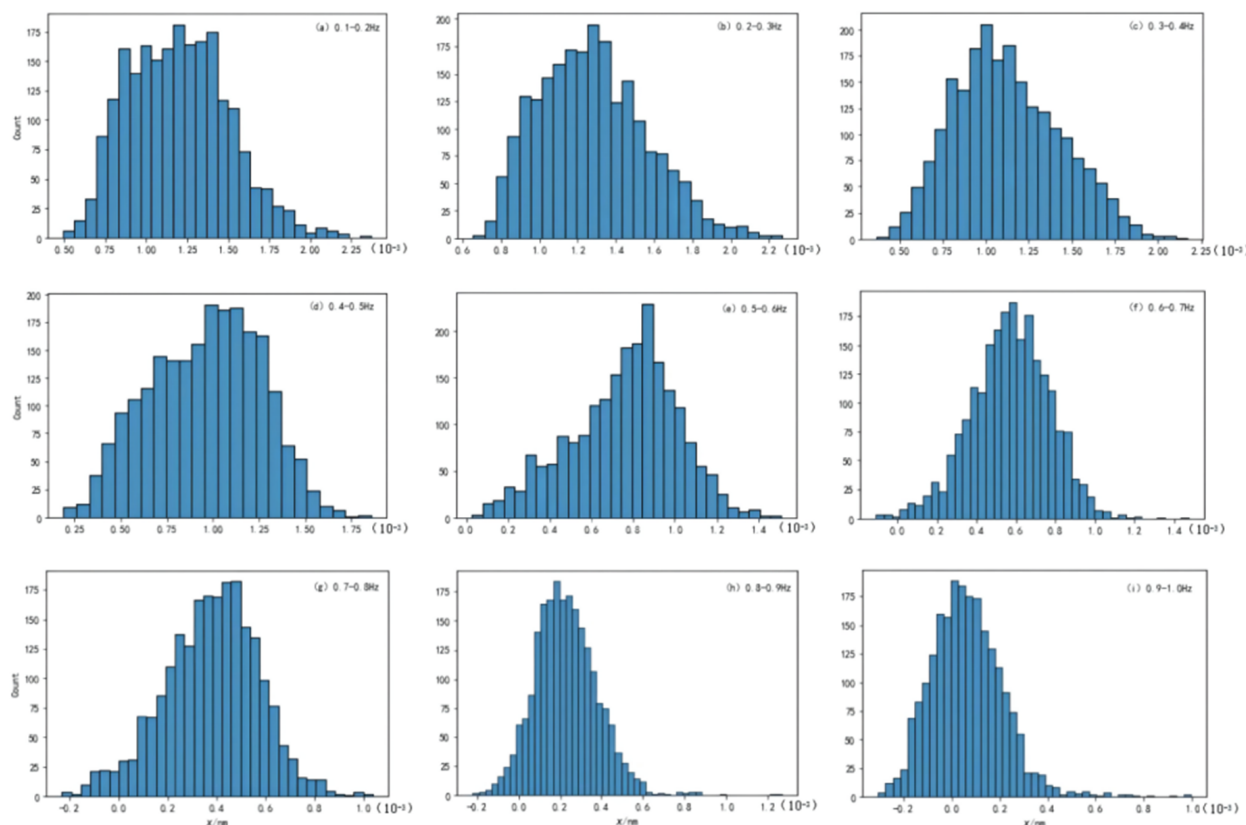


图4 YKO各频段信号取对数后位移分布

Fig.4 Displacement distribution of YKO signal in each frequency band after taking logarithm

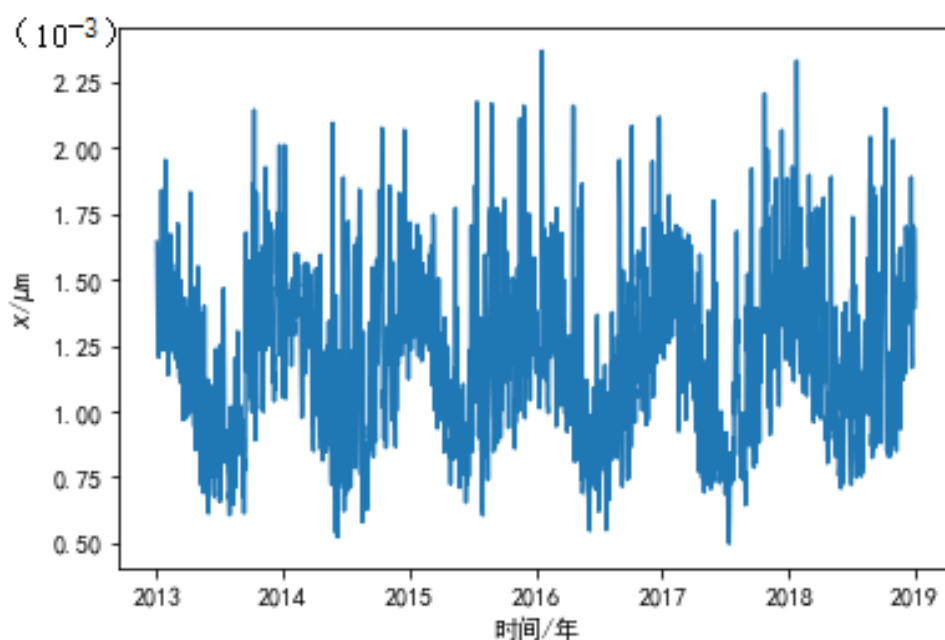


图5 YKO(0.1~0.2 Hz)频段时间振幅图

Fig.5 Time-amplitude diagram of YKO in the frequency band(0.1-0.2 Hz)

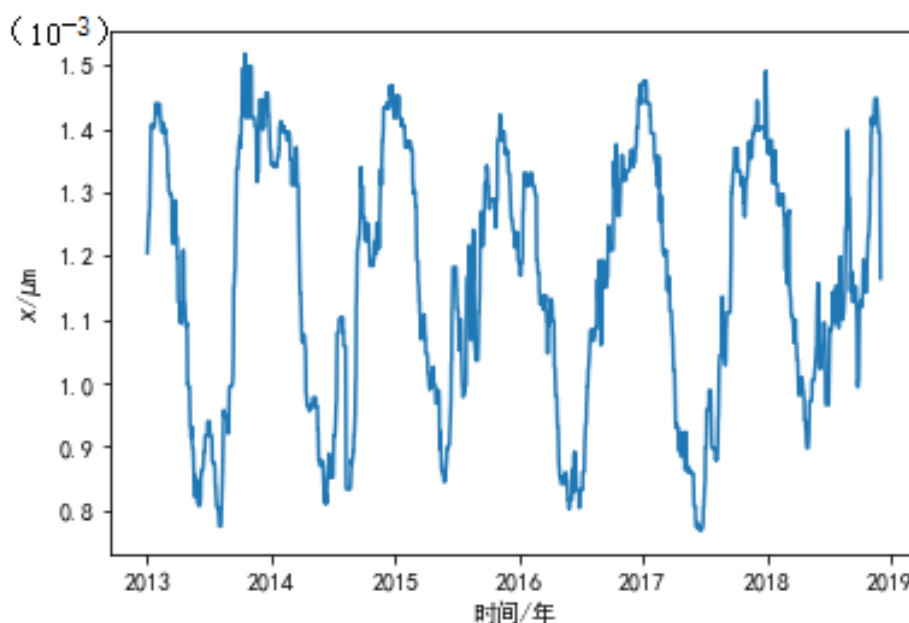


图6 YKO(0.1~0.2 Hz)频段中值滤波后时间振幅图

Fig.6 Time-amplitude diagram of YKO in the frequency band(0.1~0.2 Hz)after median filtering

在物理实验中经常要观测两个有函数关系的物理量。根据两个量的许多组观测数据来确定它们之间的函数曲线。但一些参数未知,需要确定未知参数的最佳估计值。在两个观测量中,往往总有一个量精度比另一个高得多,为简单起见把精度较高的观测量看作没有误差,并把这个观测量选作 $x$ ,而把所有的误差只认为是 $y$ 的误差。设 $x$ 和 $y$ 的函数关系由理论公式

$$y = f(x; c_1, c_2, \dots, c_m) \quad (2)$$

式(2)中 $c_1, c_2, \dots, c_m$ 是 $m$ 个要通过实验确定的参数。若不存在测量误差,则这些数据点都准确落在理论曲线上。只要选取 $m$ 组测量值代入式(1),便得到方程组

$$y_i = f(x; c_1, c_2, \dots, c_m) \quad (3)$$

求 $m$ 个方程的联立解即得 $m$ 个参数的数值。显然当 $N < m$ 时,参数不能确定;在 $N > m$ 的情况下,式(3)成为矛盾方程组,不能直接用解方程的方法求得 $m$ 个参数值,只能用曲线拟合的方法来处理。假设测量中不存在系统误差,或者已经修正,则 $y$ 的观测值 $y_i$ 围绕着期望值 $\langle f(x; c_1, c_2, \dots, c_m) \rangle$ 摆动,其分布为正态分布,则 $y_i$ 的概率密度为

$$p(y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp \left\{ -\frac{[y_i - \langle f(x; c_1, c_2, \dots, c_m) \rangle]^2}{2\sigma_i^2} \right\} \quad (4)$$

式(4)中 $\sigma_i$ 是分布的标准误差。为简便起见,下面用 $c$ 代表 $(c_1, c_2, \dots, c_m)$ 。考虑各次测量是相互独立的,故观测值 $(y_1, y_2, \dots, y_N)$ 的似然函数

$$L = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^N \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_N} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{[y_i - f(x; C)]^2}{\sigma_i^2} \right\} \quad (5)$$

取似然函数 $L$ 最大来估计参数 $C$ ,应使

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} [y_i - f(x_i; C)]^2 \Big|_{\min} \quad (6)$$

使用上述最小二乘法对三角函数模型进行曲线拟合,对各地区不同频段位移进行拟合,展示了实际位移与拟合的曲线(图7)。表2列出了每条曲线的 $A, B$ 参数。

#### 4 残差序列平稳性检验

通过建立年周期模型,拟合出来的曲线拟合优度较好,但有可能是伪回归,伪回归是一组非平稳时间序列之间不存在协整关系时这一组变量构造的回归模型中可能出现的一种“假回归”。因此需要做残差序列进行分析。利用ADF (Augmented Dickey-Fuller)检验,对残差序列进行平稳性分析。其特点是,假设时间数据序列是由一个 $P$ 阶自回归过程 $AR(P)$ 生成的,然后建立估计模型并进行单位根检验。

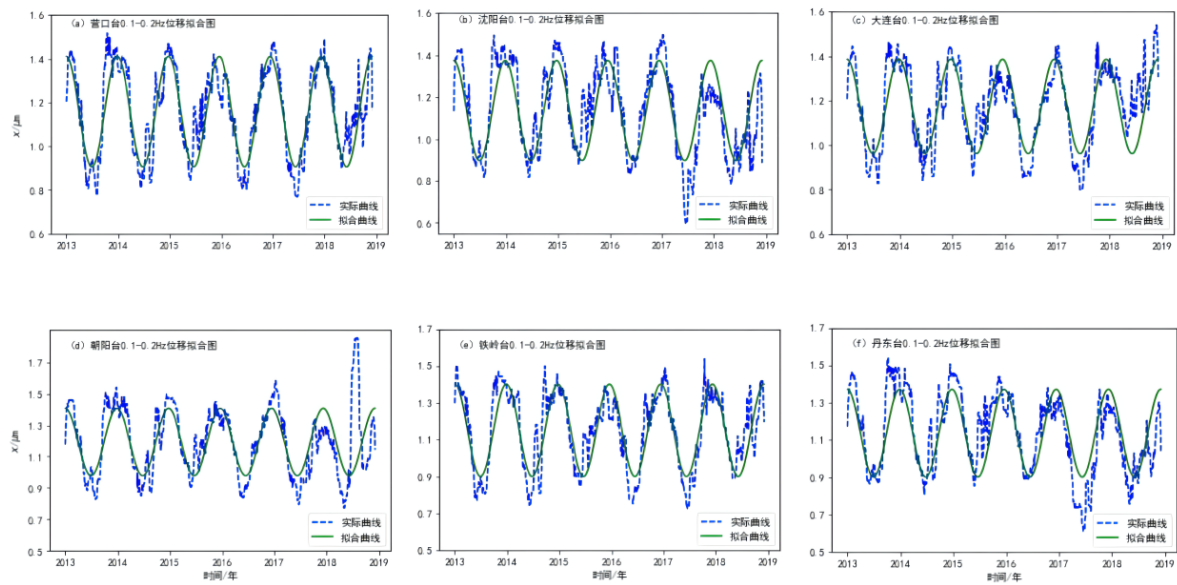


图7 各台站(0.1~0.2 Hz)实际位移拟合图

Fig.7 Fitting diagram of actual displacement of each seismic station in the frequency band(0.1–0.2 Hz)

表 2 辽宁不同地区不同频段的年周期曲线A、B值

FRE	朝阳		丹东		大连		沈阳		营口		铁岭	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.1~0.2	0.21	1.22	0.24	1.16	0.21	1.20	0.27	1.18	0.25	1.18	0.25	1.17
0.2~0.3	0.15	1.26	0.18	1.26	0.18	1.29	0.19	1.23	0.20	1.26	0.19	1.26
0.3~0.4	0.16	1.06	0.21	1.15	0.31	1.25	0.17	1.03	0.23	1.13	0.17	1.04
0.4~0.5	0.15	0.87	0.24	0.95	0.30	1.30	0.20	0.73	0.22	0.99	0.19	0.76
0.5~0.6	0.07	0.67	0.21	0.75	0.19	1.23	0.18	0.48	0.14	0.79	0.16	0.49
0.6~0.7	0.05	0.45	0.16	0.55	0.15	1.05	0.14	0.41	0.09	0.60	0.14	0.29
0.7~0.8	0.04	0.22	0.13	0.35	0.13	0.90	0.13	0.11	0.06	0.41	0.13	0.08
0.8~0.9	0.04	0.12	0.13	0.19	0.12	0.73	0.11	−0.03	0.05	0.24	0.12	−0.09
0.9~1.0	0.03	0.00	0.12	0.04	0.12	0.57	0.09	−0.14	0.05	0.08	0.11	−0.20

ADF 检验验证时间序列是否平稳，其原假设为序列不平稳。一般 $p$ 值小于0.1(或以0.05为标准)，即说明0.1水平下拒绝原假设，即序列平稳。其统计量 $t$ 为

$$t=\frac{(\hat{\rho}-1)}{\hat{\sigma}_{\hat{\rho}}}\xrightarrow{L}\frac{\frac{1}{2}\left\{\left[W(1)\right]^2-1\right\}-W(1) \int_0^1 W(r) d r}{\left\{\int_0^1\left[W(r)\right]^2 d r-\left[\int_0^1 W(r) d r\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}}$$

(7)

基于 ADF 检验逐一对建立的模型残差进行推断分析，得出营口台(0.1~0.2 Hz)残差（表3），

该时间序列数据 ADF 检验的 $t$ 统计量为−3.942， $p$ 值为0.002，1%、5%、10% 临界值分别为 −3.571、−2.923、−2.599。 $p=0.002<0.01$ ，有高于99%的把握拒绝原假设，此时间序列平稳。残差序列平稳，也证明了建立的年周期函数不是伪回归。

表4为所有台站各频段在5%的置信水平下 ADF 检验的差分阶数、 $t$ 统计量以及 $p$ 值， $p$ 值均小于0.01，有高于95%的把握拒绝原假设，即所建立的模型残差均为平稳序列，证明了建立的一系列模型都不是伪回归。

表 3 YKO(0.1 ~ 0.2 Hz)残差 ADF 检验表  
Table 3 Residual ADF test table of YKO in the frequency band (0.1~0.2 Hz)

差分阶数	<i>t</i>	<i>p</i>	临界值		
			1%	5%	10%
0	-3.942	0.002	-3.571	-2.923	-2.599

表 4 各台站残差 ADF 检验表  
Table 4 Residual ADF test table for each station

FRE	朝阳			丹东			大连			沈阳			营口			铁岭		
	阶数	<i>t</i>	<i>p</i>	阶数	<i>t</i>	<i>p</i>	阶数	<i>t</i>	<i>p</i>	阶数	<i>t</i>	<i>p</i>	阶数	<i>t</i>	<i>p</i>	阶数	<i>t</i>	<i>p</i>
0.1 ~ 0.2	0	-3.83	0.001	0	-3.84	0.001	0	-3.85	0.001	0	-3.88	0.001	0	-3.94	0.002	0	-3.91	0.002
0.2 ~ 0.3	0	-3.90	0.001	0	-3.93	0.002	0	-3.94	0.002	0	-3.98	0.002	0	-4.02	0.003	0	-4.00	0.003
0.3 ~ 0.4	0	-4.35	0.003	0	-4.36	0.003	0	-4.41	0.004	0	-4.43	0.004	0	-4.52	0.004	0	-4.47	0.004
0.4 ~ 0.5	0	-4.38	0.003	0	-4.41	0.003	0	-4.45	0.004	0	-4.46	0.004	0	-4.53	0.004	0	-4.49	0.004
0.5 ~ 0.6	0	-5.39	0.006	0	-5.41	0.004	0	-5.46	0.005	0	-5.47	0.006	0	-5.51	0.005	0	-5.47	0.005
0.6 ~ 0.7	0	-4.38	0.003	0	-4.41	0.003	0	-4.45	0.003	0	-4.49	0.004	0	-4.65	0.005	0	-4.53	0.004
0.7 ~ 0.8	0	-6.27	0.007	0	-6.14	0.007	0	-6.94	0.008	0	-3.37	0.007	0	-7.82	0.008	0	-6.99	0.008
0.8 ~ 0.9	0	-7.78	0.009	0	-7.34	0.009	0	-8.03	0.009	0	-3.87	0.009	0	-8.31	0.009	0	-7.67	0.009
0.9 ~ 1.0	0	-7.55	0.009	0	-7.89	0.009	0	-7.41	0.008	0	-4.16	0.009	0	-6.90	0.008	0	-6.84	0.008

5 结论

本文计算了辽宁省 2013 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日期间 6 个固定监测台站垂直分量连续波形记录的实际位移值，通过参数拟合得到了辽宁地区地震背景噪声年变公式，并建立了辽宁地区背景噪声模型，主要结论为：

(1)通过对辽宁省内 6 个台站背景噪声进行分析研究，排除各类干扰，计算出各台实际位移值画出年度曲线，得到辽宁地区低频背景噪声特征，结果显示其具有明显季节性特征，呈现“冬高夏低”的形态，随着频段不断升高，各台站位移值水平平均逐步减小。

(2)应用所得出的观测位移值，采用三角函数公式，利用最小二乘法拟合出辽宁地区低频背景噪声年变公式，并分别计算出各台站不同频段的相关系数(A、B 值)，最终建立辽宁地区低频背景噪声模型，并对该模型进行残差序列平稳性检验，ADF 检验结果显示为平稳序列，证明其不是伪回归，证实了模型的可靠性。

本文的研究成果可做为辽宁地区背景噪声等

相关研究的背景性资料，尤其是长时段观察类研究提供参考。

参考文献

[1] 夏英杰,倪四道,曾祥方. 汶川地震前地脉动信号的单台法研究[J]. 地球物理学报,2011,64(10):2590-2596

[2] Ritzwoller M H,左玉玲. 利用背景噪声进行地震成像[J]. 国际地震动态,2009(09):15-20.

[3] 陶夏新,刘曾武,郭明珠,等. 工程场地条件评定中的地脉动研究[J]. 地震工程与工程振动,2001,21(4):18-23.

[4] Webb S. The Earth's ‘hum’ is driven by ocean waves over the continental shelves [J]. Nature, 2007, 445 (7129): 754-756.

[5] 朱传镇,房明山,安镇文,等. 脉动与地震关系的初步探讨 [J]. 地球物理学报,1977,30(1):20-32.

[6] 冯德益,陈化然,丁伟国. 大震前地震波频谱异常特征的研究[J]. 地震研究,1994,17(4):319-32.

[7] 靳庭良. ADF 检验与 PP 检验的可靠性比较[J]. 统计与决策,2007(14):8-10.

[8] IEEE. IRE Transactions on Aeronautical and Navigational Electronics[M]. New York: IEEE, 1960.

[9] McNamara D E, Buland R P. Ambient noise levels in the continental United States[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2004,94(4): 1517-1527.



- [10] 张晓清,袁伏全,余娜. 2016年门源6.4级地震地脉动应变前兆异常特征初步研究[J]. 地震研究,2016,39(S1):37-44+135.
- [11] 荆涛,孙艺,方禹心,等. 灯塔M5.1地震前沈阳地震台地脉动研究[J]. 防灾减灾学报,2019,35(04):41-45.
- [12] 荆涛,孙艺,方禹心,等. 地震前超宽频带地脉动记录异常变化特征探讨[J]. 防灾减灾学报,2020,36(4):88-94.
- [13] 梁沙沙,高立新,薛丁,等. 阿拉善左旗5.8级地震前地脉动信号特征分析[J]. 地震工程学报,2018,30(4):808-814.
- [14] 王晔,罗银河,吴树成,等. 西准噶尔地区地震背景噪声源分析[J]. 地球物理学报,2017,60(4):1376-1388.
- [15] 陈玉鑫,唐明帅. 地震背景噪声互相关方法应用研究综述[J]. 地震研究,2021,44(04):594-606.
- [16] 刘志坤,黄金莉. 利用背景噪声互相关研究汶川地震震源区地震波速度变化[J]. 地球物理学报,2010,53(4):853-863.
- [17] 王伟涛,倪四道,王宝善. Study on the characteristics of microseisms in the Yunan region, China[J]. 地震,2011,31(4):58-67.
- [18] 陈化然,郭瑞芝. 地脉动及特殊波形的频谱特性在地震预报中的应用[J]. 地震,1998,18(1):75-82.
- [19] 刘巧霞,邱勇,曾祥方,等. 基于中国内陆大孔径地震台阵的Rayleigh面波噪声源分布特征研究[J]. 地球物理学报,2020,63(7):2534-2547.
- [20] 董蕾,杨立明. 汶川大震前数字地震仪位移地脉动低频异常现象研究[J]. 地震工程学报,2012,34(3):268-273.
- [21] 吴建平,欧阳飏,王未来,等. 华北地区地震环境噪声特征研究[J]. 地震学报,2012,34(6):818-829.
- [22] 梁建宏,刘杰,杨文,等. 一种低频地震事件的检测方法——在汶川地震和芦山地震前的初步应用[J]. 地震,2015,35(1):1-10.
- [23] Tanimoto T, Ishimaru S, Alvizuri C. Seasonality in particle motion of microseisms[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society,2010,166(1):253-266.
- [24] 许康生,李秋红,李英,等. 大地震前近台背景噪声的频谱分析[J]. 地震工程学报,2012,34(2):150-153.