

胡小刚,郝晓光. 强台风对汶川大地震和昆仑山大地震“震前扰动”影响的分析. 地球物理学报, 2009, **52**(5):1363~1375, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.026

Hu X G, Hao X G. An analysis of the influences of typhoon on anomalous tremors before the great Wenchuan and Kunlunshan earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(5):1363~1375, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.026

强台风对汶川大地震和昆仑山大地震“震前扰动”影响的分析

胡小刚,郝晓光*

中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量重点实验室, 武汉 430077

摘 要 2008 年 8.0 级汶川大地震发生前约 40 h 起,中国地震局测震台网中的宽带地震仪、重力仪和倾斜仪都记录到了明显的低频扰动现象. 然而,在此期间西太平洋上空产生了一次强台风 Rammasun(威马逊);与此类似,2001 年 8.1 级昆仑山大地震发生前约 60 h 起,国家地震局测震台网中的宽带地震仪也记录到了明显的低频扰动现象,在此期间中国南海上空产生了一次强台风 LingLing(玲玲). 本文针对这两大地震的“震前扰动”现象进行了研究,旨在探讨其“震前扰动”现象是否与台风引起的巨浪产生的地脉动效应有关. 我们的研究表明:在中国内陆观测到的异常扰动与台风路径以及台风的强度密切相关. 近海台风可在中国大陆内地引起明显的异常扰动;而远离大陆海岸位于深水海域上空的台风,很难在中国大陆内地引起明显的异常地脉动变化. 台风 LingLing 的路径距离中国海岸最近处仅有约 700 km,而台风 Rammasun 距离中国大陆海岸最近处却达 1300 km. 本文的对比分析研究表明:路径和强度类似于 LingLing 的台风在中国内陆可引起明显的异常扰动. 因此,中国内陆和沿海许多地震台记录到的昆仑山大地震的“震前扰动”源于 LingLing 地脉动效应的可能性较大;但位于新疆的地震台记录到的扰动信号频率却明显偏低,这一现象值得注意. 路径和强度类似于 Rammasun 的台风很难在中国内陆引起明显的异常扰动,因此汶川大地震的“震前扰动”完全源于台风 Rammasun 地脉动效应的可能性较小. 汶川大地震的“震前扰动”产生的原因和机理值得我们去进行深入的探讨和研究.

关键词 2008 汶川大地震,2001 昆仑山大地震,震前扰动,异常地脉动,台风,小波分析

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.026

中图分类号 P315

收稿日期 2009-01-24,2009-04-24 收修定稿

An analysis of the influences of typhoon on anomalous tremors before the great Wenchuan and Kunlunshan earthquakes

HU Xiao-Gang, HAO Xiao-Guang*

Key Laboratory of Dynamical Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract Anomalous tremors were widely recorded by seismographs, gravimeters and tiltmeters in the National Digital Seismograph Network of China (NDSN) about 40 hours before the 2008 M_s 8.0 Wenchuan earthquake. However, a violent typhoon, named Rammasun, was taken place over the western Pacific before the earthquake. Similarly, anomalous tremors also appeared about 60 hours before the 2001 M_s 8.1 Kunlunshan earthquake, while a violent typhoon LingLing was

基金项目 国家自然科学基金(40774011, 90814009, 40874036)以及质检公益性行业科研专项基金“数字化地震前兆地壳形变观测方法标准研究”(10-215)资助.

作者简介 胡小刚,男,副研究员,主要研究方向为地学信号处理与分析.

* **通讯作者** 郝晓光,研究员, E-mail: hxg@whigg.ac.cn

produced. In this paper, we study if these anomalous tremors before the great earthquakes are relevant to the typhoon events. Our results show that many anomalous tremors in the inner-land appeared during typhoon and their amplitudes depend on the distance from the track of typhoon and the strength of typhoon. A violent typhoon close to the coast of China can cause strong microseisms which can be widely observed in the inner-land of China, but a typhoon far from the coast of China cannot do that. The nearest distance from the track of LingLing to the coast of China is about 700 km, and that for Rammasun is about 1300 km. Our investigation shows that a typhoon which has a similar track and strength as that of LingLing can surely cause significant anomalous tremor in the inner-land of China, but it is contrary for a typhoon similar to Rammasun. Anomalous tremors recorded by many seismographs in NDSN before the Kunlunshan earthquake are most likely caused by LingLing, however, strong anomalous tremors in Xinjiang region have low frequencies. We suggest that the anomalous tremors before the Wenchuan earthquake are less likely to be entirely attributed to Rammasun. It is worthwhile to make further study of the cause and mechanism of anomalous tremors before the Wenchuan earthquake.

Keywords The 2008 great Wenchuan earthquake, The 2001 great Kunlunshan earthquake, Anomalous tremors before earthquakes, Anomalous microseisms, Typhoon, Wavelet analysis

1 引言

2008年5月12日14时28分,里氏8.0级强烈地震袭击了四川省汶川县。“武汉大地测量国家野外科学观测研究站”的LacosteET重力仪在地震发生前两天开始记录到了明显的异常扰动^[1]。随后我们发现国家测震台网多个台站的地震仪、重力仪和倾斜仪在汶川大地震发生前都记录到了类似的异常扰动^[2,3];在汶川大地震发生前三天,扰动信号开始出现,并逐渐增大;扰动信号振幅的外包络线呈现明显的喇叭形状;扰动信号的周期范围为2~8 s,主要集中在4~8 s范围。

汶川大地震的“震前扰动”信号出现在低频地脉动频段。地脉动是地壳微弱的弹性波运动。产生地脉动的原因很多,但产生低频地脉动的主要原因是海浪。通常情况下,远离海岸的中国内陆的地震仪记录到的地脉动信号是振幅变化稳定的信号。在强台风靠近或进入沿海区域时,这些地震仪经常会记录到异常的地脉动信号,其振幅在台风发生期间内明显增大。但在一些强震前后,即使没有台风的影响,宽带地震仪也能记录到一些异常的地动信号。这些信号相对正常的地震波而言,其频率较低,衰减时间较长。

2008年5月8日~13日西太平洋上空产生了一

次14级强台风Rammasun(威马逊),Rammasun移动路径距离中国海岸的较远,即使是最近处也达约1300 km。因此,Rammasun对中国近海气象无影响。但是,由于汶川大地震的“震前扰动”现象与台风Rammasun的发生在时间上十分巧合,人们有理由怀疑台风Rammasun与汶川大地震的“震前扰动”现象有关。类似的情况,2001年11月14日昆仑山 M_s 8.1级大地震发生前约60 h起,国家地震局测震台网中的宽带地震仪都记录到了明显的“震前扰动”现象,而在此期间中国南海上空刚好也产生了一次17级的强台风LingLing(玲玲)。LingLing距离中国海岸最近处仅有约700 km。昆仑山大地震的“震前扰动”现象是否也与台风有关?

本文首先介绍了如何用小波分析方法从地震仪的观察记录中提取地脉动信号。在分析研究了台风引起地脉动异常的机理后,我们调查了多个发生在西太平洋上空的台风事件,其中一些台风的行动路径距中国海岸较近,有一些较远,还有些台风的强度及行动路径与台风Rammasun相似。利用中国地震局测震台网中的宽带地震仪的连续观测数据,我们用小波分析方法和傅里叶分析方法提取这些台站在台风事件发生期间所记录到的地脉动信号。通过分析地脉动信号的振幅变化与台风强度和行动路径的关系,探讨汶川大地震前的“震前扰动”以及昆仑山大地震的“震前扰动”是否与台风事件有关。

2 小波方法提取地脉动信号

西安地震台(XAN),恩施地震台(ENH)和昆明地震台(KMI)都采用瑞士产 STS 型宽频带地震仪,连续观测记录地震波. STS 型地震仪的低频通道(LHZ,LHE,LHN)可提供采样率为 1 Hz 的低频地震波连续观测数据. 地脉动信号是这种低频地震波观测记录中的高频信号,且集中在较窄的频率范围(0.1~0.5 Hz)内. 小波分析方法十分适合提取这种高频窄带信号. 国产宽频带地震仪(JCZ 型或 CTS)只提供采样率为 50 Hz 的连续观测数据,我们先将观测数据重新采样为采样率为 1 Hz 的连续观测数据,然后再用小波分析方法提取异常扰动信号.

采用小波带通滤波器从地震仪连续观测记录中提取地脉动变化的时间序列,然后与台风过程(台风的强度和路径变化)进行比较,来分析台风过程与地脉动变化的关系. 所用的小波带通滤波器是利用高阶 Daubechies 小波^[4, 5]进行正交小波变换和逆变换^[6, 7]构造出来的正交滤波器组^[8]. 图 1 显示小波带通滤波器的构造,它实际上是利用正交小波构成的正交镜像滤波器组. 正交滤波器组由分解滤波器组与合成滤波器组两部分构成. 分解滤波器组由半

带低通滤波器、半带高通滤波器以及隔二抽取器组成. 分解滤波器组完成输入数据的正交小波变换,其输出为小波变换系数. 合成滤波器组由半带低通滤波器、半带高通滤波器以及隔二插值器组成. 合成滤波器组可完成正交小波逆变换,其输出为滤波后的结果. 低通滤波器与高通滤波器之间存在镜像对称(参见图 1b),因此小波带通滤波器不会引起滤波信号的相移. 由于 Daubechies 为紧支撑小波,使得半带滤波器的长度有限,因而小波带通滤波器没有 FIR(Finite Impulse Response)滤波器所特有的吉布斯现象. 用高阶 Daubechies 小波构建的半带滤波器具有良好频率响应(图 1a). 采用合适的高阶 Daubechies 小波,避免过强的滤波边界效应,可使小波带通滤波器既具有狭窄的带通,又具有良好频率响应.

图 1 可直观地了解小波带通滤波器的工作原理. n 层分解滤波器组可将输入信号分解为 $n+1$ 组小波变换系数. 设输入信号的尼奎斯特频率范围为 $0 \sim F$. $n+1$ 组小波变换系数对应的频率范围分别为 $0 \sim F/2^n, F/2^k \sim F/2^{k-1}, k=1, 2, \dots, n$. n 层合成滤波器组可利用 $n+1$ 组小波变换系数来无失真地重构输入信号,如果只选择其中一部分小波变换系数重构输入信号,正交滤波器组可成为高通、低通或带通滤波器. 图 1a 显示采用了第 3 组小波变换系数重

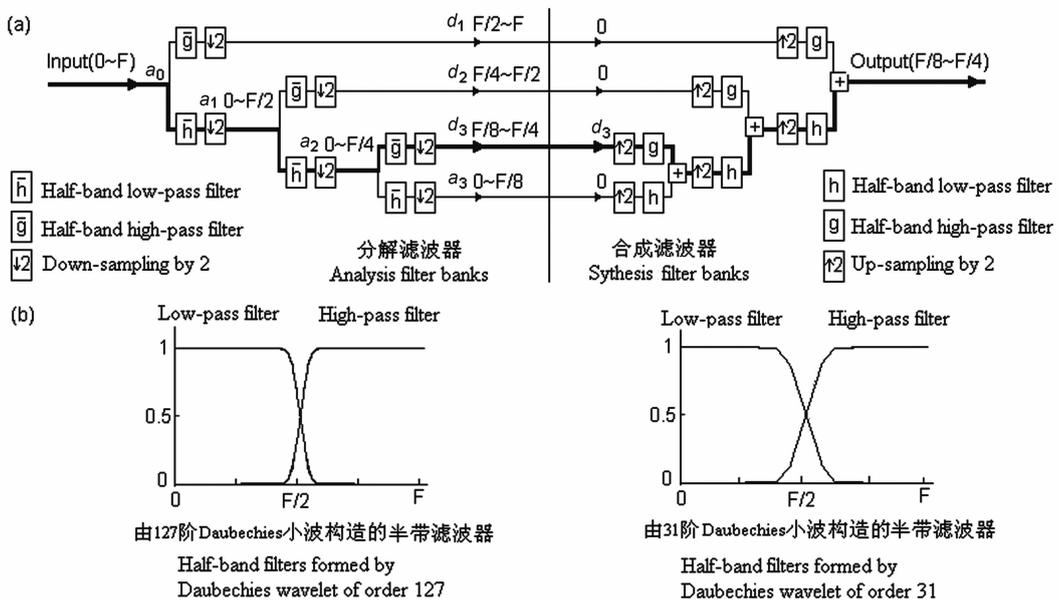


图 1 小波带通滤波器滤波原理

(a) 三层分解滤波器组将具有尼奎斯特频率范围 $0 \sim F$ 的输入信号 $f(t)$ 分解为四组小波变换系数 a_3, d_1, d_2 和 d_3 . 合成滤波器组只用小波变换系数 d_3 重建信号,因此输出信号的频率范围为 $F/2^3 \sim F/2^2$. (b) 半带滤波器的频率响应.

Fig. 1 The filtering scheme of wavelet band-pass filter

(a) The three-level wavelet analysis filter bank decomposes input signal $f(0 \sim F)$ into four coefficient sequences a_3, d_1, d_2 and d_3 in 4 subbands. Synthesis filter banks reconstruct the signal only with d_3 , thus the frequency band of output is $F/2^3 \sim F/2^2$. (b) Frequency response of half-band filters.

构输入信号,小波正交滤波器组成为带通滤波器.其输出信号的频率范围是 $F/2^3 \sim F/2^2$.

我们用 31 阶 Daubechies 小波构建带通滤波器,并用其处理了昆明台的 STS 宽带地震仪 LHZ 通道在 2008 年 5 月 4 日~18 日期间所观测到的地震波记录.观测记录的尼奎斯特频率范围为 $0 \sim 0.5$ Hz ($2 \sim \infty$ s).由 4 层小波滤波器将观测数据分解可得到 4 组高频时间序列,其对应的周期范围分别为 $2 \sim 4$ s, $4 \sim 8$ s, $8 \sim 16$ s, $16 \sim 32$ s.由图 2 可知:汶川大地震的“震前扰动”信号主要集中在 $4 \sim 8$ s 的周期范围内;从 5 月 9 日到 5 月 12 日,脉动信号的振幅由小逐渐增大,其外包络线呈现明显的喇叭形状.

2 台风对地脉动的影响

海浪变化会引起海底压力变化,从而引起地脉动.海浪是产生低频地脉动的最主要原因.海浪引起的地脉动又称微地震(Microseisms).实际观测表明海浪引起的地脉动的优势频率明显高于海浪频率.英国海洋学家 Languet-Higgins 在 1950 年提出了著名的海浪波动非线性干涉理论^[9],用海浪驻波解释海洋引起的地脉动现象.Hasselmann^[10],Tanimoto^[11,12]进一步扩充和发展了这一理论.Higgins 海洋驻波理论认为地脉动主要与海浪非线性干涉引起的海浪驻波有关,其海浪非线性干涉的一维简化模型表明:当两个传播方向相反、频率相同的海波,在海面上传播而发生干涉时,可形成海水驻波,驻波引起的海底压强 P 变化为

$$P = -0.5\rho a_1 a_2 \omega^2 \cos(2\omega t),$$

其中 a_1, a_2 为海波的振幅, ρ 为海水密度, ω 为海浪的频率.由此可见,驻波引起的海底压强变化频率是海浪起伏变化频率的 2 倍.海浪驻波引起的海底压强变化与海水的深度无关,可传播到海底而不衰减.而海浪(海水行波)直接产生的洋底压强会随着海水深度增加呈指数衰减.许多观测和研究证实 Higgins 海洋驻波理论能合理地解释在浅水海域海浪激发的地脉动现象,较好地说明能量从大气层传入海洋并传至海底,产生地脉动的过程以及地脉动的优势频率高于海浪频率的原因^[13~16].

根据 Higgins 的理论,海浪产生两种地脉动效应:一是由海浪直接产生的脉动,称为第一类脉动或原生脉动(Primary Microseisms),其频率与海浪周期相同,周期范围大约为 $0.05 \sim 0.1$ Hz(周期范围 $10 \sim 20$ s);另一是由海浪相互干涉,形成海水驻波

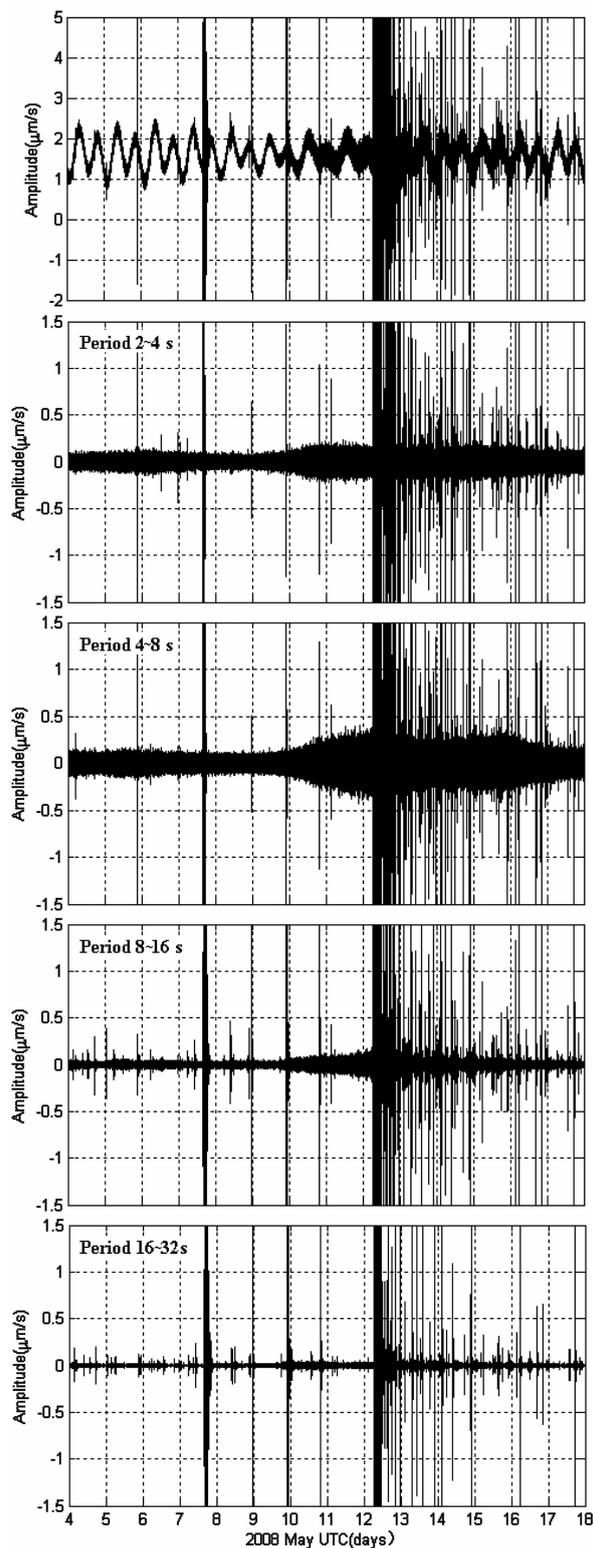


图 2 由 4 层小波滤波器分解昆明台 STS 地震仪 LHZ 通道的观测记录,得到 4 组不同频率的时间序列,其对应的周期范围分别为 $2 \sim 4$ s, $4 \sim 8$ s, $8 \sim 16$ s, $16 \sim 32$ s.汶川地震的“震前扰动”信号主要集中在 $4 \sim 8$ s 的周期范围内.

Fig. 2 The four-level wavelet analysis filter bank decomposes data of LHZ from STS at station KMI into four time series, with their period bands are $2 \sim 4$ s, $4 \sim 8$ s, $8 \sim 16$ s, $16 \sim 32$ s, respectively. The anomalous tremors before the great Wenchuan earthquake are strongly present in the band of $4 \sim 8$ s.

在海底产生压力而引起的脉动,称为第二类脉动或次生脉动(Secondary Microseisms),其频率为海浪频率的 2 倍,频率范围大约为 0.1~0.5 Hz(周期范围 2~10 s). 次生脉动的能量比原生脉动能量大许多,因此地脉动信号主要出现在 0.1~0.5 Hz 的频

率范围.

台风是海洋上空围绕低气压中心猛烈旋转的热带大气漩涡,台风蕴含着巨大的能量,其风力影响半径在几十公里乃至上百公里. 台风靠近大陆海岸时,会引起巨浪冲击海岸和海底,产生大量的反射波浪.

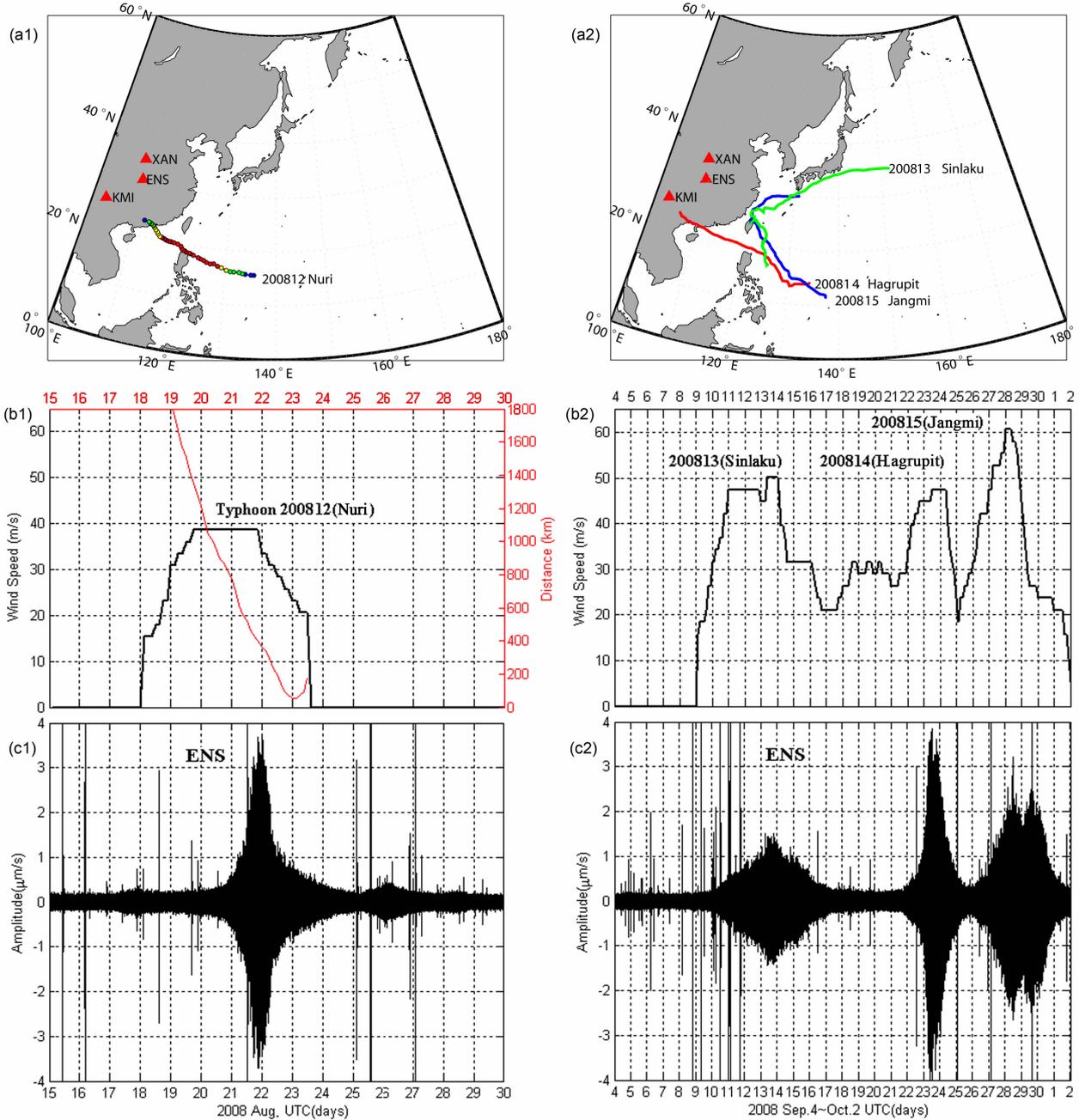


图 3 (a1,a2) 2008 第 12、13、14、15 号台风的路径图。(b1,b2) 台风风速随时间的变化。图 b1 中的红线表示台风 Nuri 的路径到珠海海岸的距离变化。(c1,c2) 在这些台风发生期间,恩施台记录到了强烈的异常扰动信号. 扰动信号主要集中在 4~8 s 的周期范围内.

Fig. 3 (a1,a2) The tracks of typhoon No. 12, 13, 14 and 15 in 2008. (b1,b2) The wind-speed variations of these typhoons. The red curve in Fig. b1 is the variation of distance between the track of Nuri and the coast of Zhuhai, China. (c1,c2) The strong anomalous tremors were observed at station ENH during the four typhoons, which are strongly present in the period band of 4~8 s.

反射波浪与原生海浪的频率相近,传播方向相反,二者相互干涉后会产生很强的海洋驻波,在海底产生巨大的压力变化,在此压力的作用下,地壳会产生很强的脉动。由于中国大陆地壳较为完整,台风引发的地脉动所产生的地震波可在中国大陆传播很远。因而在中国内陆的地震仪上可经常观测到由近海台风引起的异常地脉动。图 3 显示了几个这样的例子:2008 第 12 号台风 NURI 进入中国近海并在珠海海岸附近登陆,当 NURI 距离海岸约 800 km 时,恩施台开始记录到了地脉动异常信号;当 NURI 距离海岸约 400 km 时,所记录到的异常信号振幅达到最强。2008 第 13,14,15 号台风在恩施台也激发了强烈的地脉动。虽然 12,14 号台风的强度相对于 13,15 号台风的强度较弱,但由于 12,14 号台风离海岸更近,因此激发了更强的地脉动。

台风距离中国大陆海岸线稍远时,仍然能激发较强的地脉动,其地震波可传播至中国内陆。图 4 显示 2004 第 24 号台风 Tonkage 发生期间,西安台记录到了明显的异常扰动。Tonkage 到台湾西海岸的最近距离约 550 km。

根据 Higgins 的理论,台风产生在深海区域上空时,难以产生很强的海洋驻波,因而很难激发次生地脉动^[12,16]。因此,当台风行动路径在远离中国大陆海岸的西太平洋深水海域上空时,中国内陆地震台很难观察到异常地脉动。例如图 5 显示:2005 年第 11 号台风 Mawar 的最大风力达到 15 级,但由于其行动路径距离中国大陆海岸很远,最近处也约有 1500 km。因而在 Mawar 发生期间,中国内陆地震台未记录到明显的异常地脉动变化。

3 台风 LingLing 对昆仑山大地震“震前扰动”的影响

2001 年 11 月 7 日~13 日中国南海上空产生了一次强台风 LingLing,其行动路径距离中国大陆海岸较近(图 6)。11 月 11 日当 LingLing 的风力达到 17 级时,此时台风中心距离中国大陆海岸线最近,距离海南岛约 560 km。由于 LingLing 的行动路径距离中国大陆海岸较近,LingLing 激发了强烈的异常地扰动,其产生的震动波能深入到中国大陆内地。图 7 显示昆明台和恩施台站在 11 月 9 日~13 日期间记录到了强烈的异常地脉动。远在新疆的乌鲁木齐地震台(WMQ)在台风期间也记录到了明显的异常地脉动。乌鲁木齐地震台地处于中国大陆西部,距

离台风 LingLing 发生的海域约 4000 km。类似地,新疆境内的和田地震台(HTA)、乌什地震台(WUS)、喀什地震台(KSH)以及库尔勒地震台(KUL)也都在此期间记录到了明显的异常地脉动。

2001 年 11 月 14 日在昆仑山西口爆发了 8.1 级大地震。位于新疆的地震台距离昆仑山大地震的震中较近,因而这些地震台记录到的异常扰动一直被认为是与昆仑山大地震相关的慢地震事件^[1,17]。根据第 2 节的分析结果,由于台风 LingLing 的行动路径距离中国大陆海岸较近,我们认为昆明台和恩施台记录到的昆仑山大地震的“震前扰动”源于台风 LingLing 地脉动效应的可能性较大。但对于新疆地震台记录到的异常扰动,结论还不能如此简单。我们注意到:与昆明台和恩施台记录到的异常地脉动相比,新疆境内地震台记录到的异常地脉动有明显的区别。小波分析的结果(图 7)表明:在 8~16 s 的周期范围,乌鲁木齐地震台的异常扰动明显强于昆明台和恩施台的异常地脉动。进一步进行傅里叶分析(图 8),结果表明:在昆明台和恩施台,异常地脉动的优势频率范围为 0.16~0.25 Hz(周期 4~6.25 s);而在新疆的 5 个地震台,异常扰动的优势频率范围为 0.1~0.15 Hz(周期 6.7~10 s)。相互比较,新疆地震台记录到的异常扰动信号频率明显偏低。

为了检查 LingLing 台风是否激发了新疆地震台记录到的低频异常扰动信号,我们对位于海南岛的琼中地震台(QIZ)的观测记录进行了分析。琼中地震台距离 LingLing 激发地脉动的区域较近,大约为 600 km。图 6 显示了地震波从台风地脉动激发区域到乌鲁木齐台的传播路径。由图可见,琼中台就在此路径上,昆明台距离该路径很近。分析结果表明:台风期间,琼中台和昆明台观测到的异常地脉动信号集中在 0.16~0.25 Hz 频率范围,而在频段 0.1~0.15 Hz 中异常地脉动信号很弱(参见图 8)。这说明 LingLing 台风在频段 0.1~0.15 Hz 中没有激发大振幅的异常地脉动信号。

虽然新疆地震台记录到的扰动事件与台风事件在时间上十分巧合,但是,新疆地震台记录到的显著异常低频扰动在距离台风最近的琼中地震台并未出现。因此,新疆地震台在昆仑山大地震前记录到的显著异常扰动究竟是与昆仑山大地震相关的慢地震事件,还是与台风有关的异常地脉动事件?目前还很难给出答案。如果新疆地震台记录到的扰动与台风 LingLing 有关,什么因素导致扰动地震波的显著频移?这些问题值得我们做进一步深入研究。

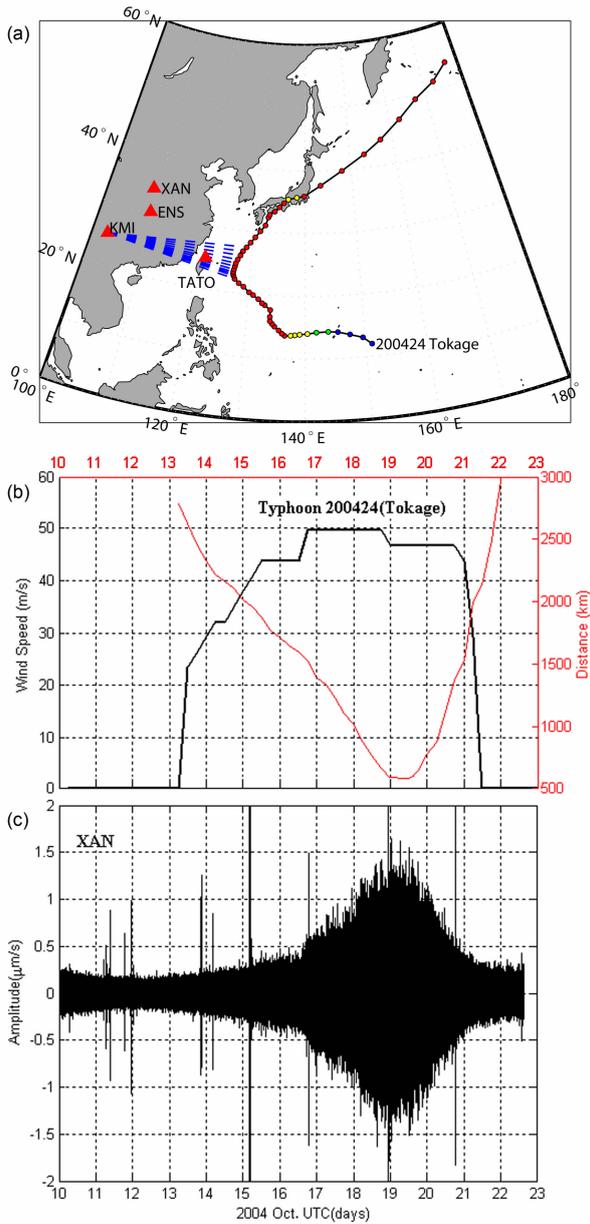


图4 (a) 2004年第24号台风Tokage的路径图。(b)台风风速随时间的变化,图中红线表示台风中心到台湾西海岸的距离变化。(c)在台风Tokage发生期间,西安台记录到了明显的异常扰动。地脉动信号主要集中在4~8 s的周期范围内。

Fig. 4 (a) The track of Tokage, the typhoon No. 24 in 2004. (b) The wind-speed variations of Tokage. The red curve is the variation of distance between the track of Tokage and the west coast of Taiwan, China. (c) The strong anomalous tremors were observed at station XAN during the typhoon, which are strongly present in the period band of 4~8 s.

4 台风Rammasun对汶川大地震“震前扰动”的影响

在汶川大地震发生期间,西太平洋上空产生了

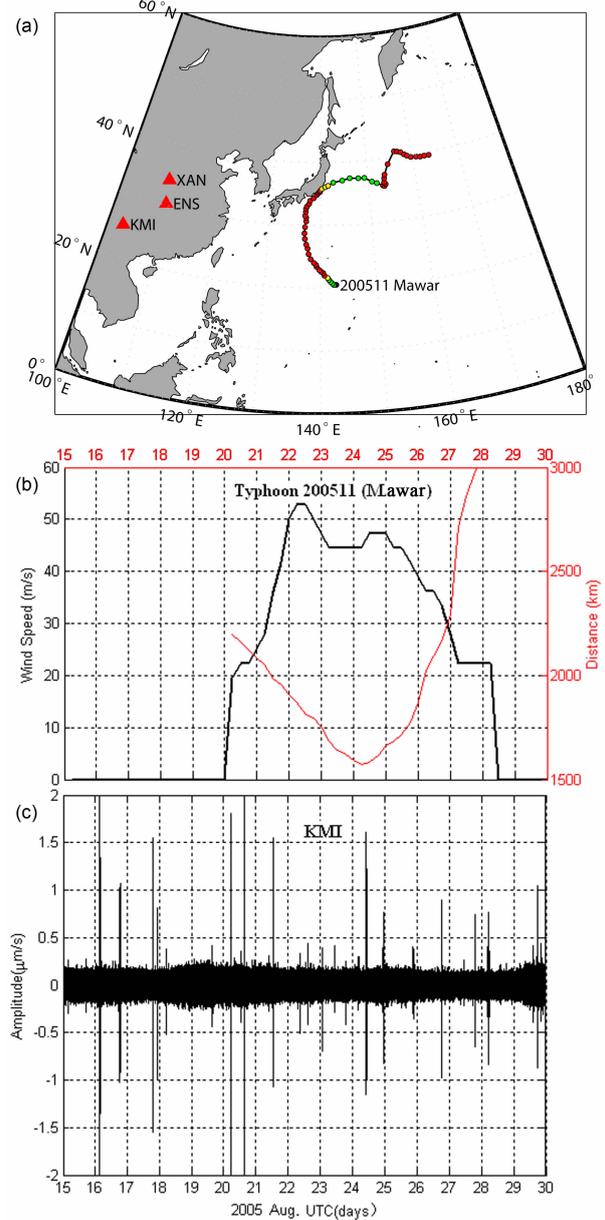


图5 (a) 2005年第11号台风Mawar的路径图。(b)台风风速随时间的变化,图中红线表示台风路径到中国大陆海岸的距离变化。(c)由于台风Mawar行动路径距离大陆海岸很远,因而在台风Mawar发生期间,昆明地震台未记录到明显的异常扰动。

Fig. 5 (a) The track of Mawar, the typhoon No. 11 in 2005. (b) The wind-speed variations of Mawar. The red curve is the variation of distance between the track of Mawar and coasts of China. (c) No significant anomalous tremors were observed at station KMI during the typhoon because the track of Mawar is far from coasts of China.

一次强台风:2008年第2号台风Rammasun(威马逊)。根据中央气象台报道:Rammasun于5月8日在菲律宾以东的西北太平洋洋面生成,开始时为强热带风暴,风暴中心附近最大风力为8级(18 m/s)。随后,风暴中心向偏北方向移动,风力强度逐渐增

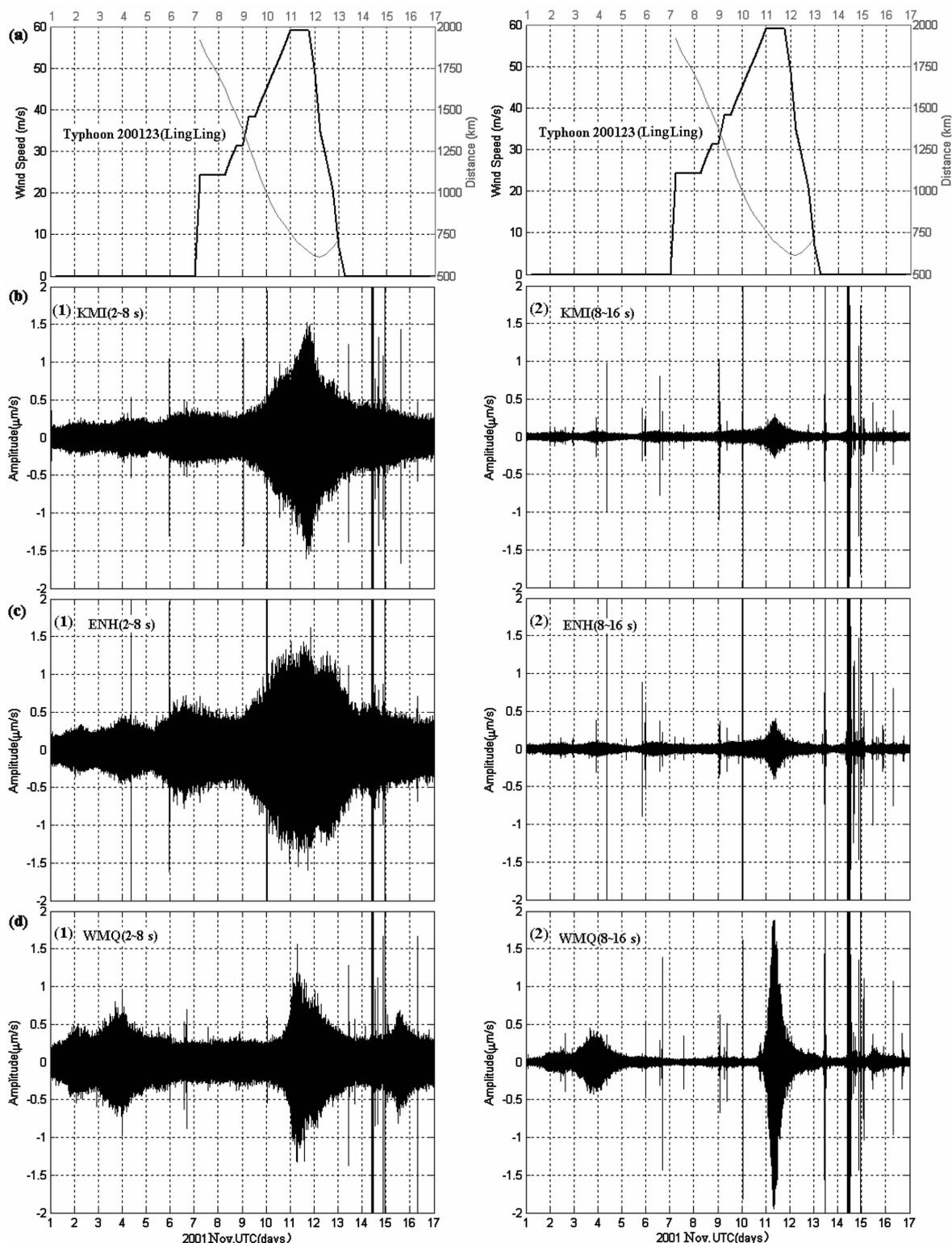


图7 (a)台风 LingLing 的风速随时间的变化,图中灰线表示台风中心到中国海岸的距离变化。(b),(c)和(d)分别为昆明台(KMI),恩施台(ENH)和乌鲁木齐台(WMQ)在台风期间记录到的异常扰动。

(1)在周期段 2~8 s 的异常扰动;(2)在周期段 8~16 s 的异常扰动。

Fig. 7 (a) The wind-speed variation of LingLing. The gray curve is the variation of distance between the track of LingLing and coasts of China. (c) The anomalous tremors observed at stations KMI, ENH and WMQ during the typhoon, which are (1) in the period band of 2~8 s and (2) in the band of 8~16 s, respectively.

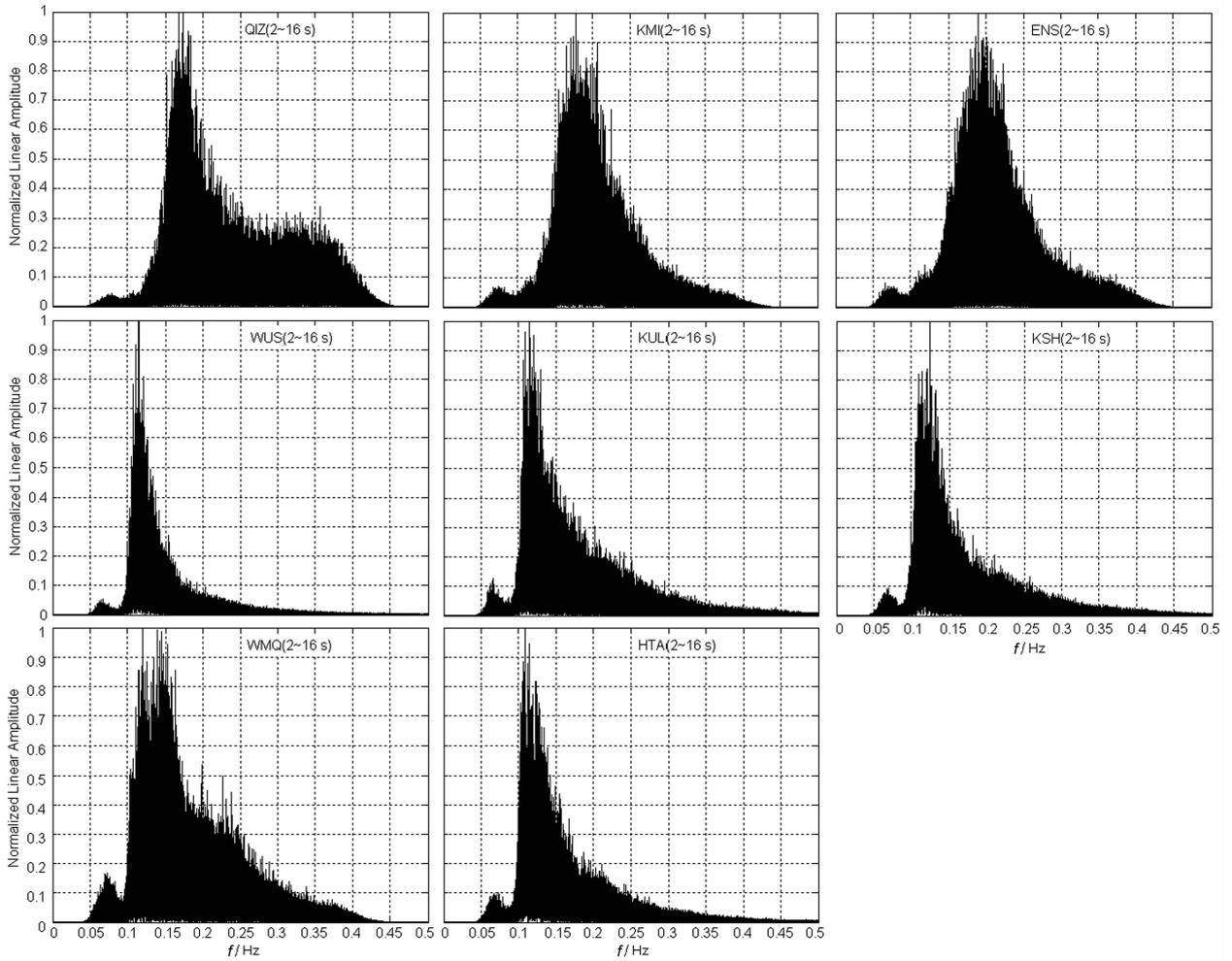


图 8 琼中台(QIZ)、昆明台(KMI)、恩施台(ENH)和 5 个新疆台地脉动异常信号的振幅谱
 振幅谱的时间窗为 11 月 10 日~12 日。琼中台和昆明台、恩施台观测到的异常地脉动信号的优势频率
 范围为 0.16~0.25 Hz, 5 个新疆台观测到的地脉动异常信号的优势频率范围为 0.1~0.15 Hz.

Fig. 8 The amplitude spectra of anomalous tremors observed at stations QIZ, KMI, ENH and at
 five Xinjiang stations WUS, KUL, KSH, WMQ and HTA

For all spectra, the time window is Nov. 10~Nov. 12. Dominant frequency band of anomalous tremors
 at QIZ, KMI and ENH is 0.16~0.25 Hz, and that at five Xinjiang stations is 0.1~0.15 Hz.

强,形成强台风。在 5 月 11 日风力达到最大,为 14 级(45 m/s)。此后,Rammasun 的风力逐渐减弱,于 5 月 13 日变性为温带气旋。台风 Rammasun 的行动计划距中国海岸较远,台风路径距离台湾西海岸最近处约 1200 km。Rammasun 是否可能在中国内陆引起大振幅的异常地脉动?

我们通过分析比较该区域历史上与 Rammasun 类似的台风过程及其发生期间记录到的地脉动特征,讨论汶川大地震的“震前扰动”是否由台风 Rammasun 引起。图 9 显示了台风 Rammasun 以及另外 5 个西太平洋强台风:2003 第 17 号台风 Ketsana、2004 第 23 号台风 Ma-on、2005 年第 4 号台风 Nesat、2005 第 20 号台风 Kirogi 以及 2008 年第 5 号台风

Nakri。这 5 个西太平洋强台风的行动路径和强度与 Rammasun 相似:台风最大风力为 14 级左右;台风的行动计划到中国海岸的最近距离约为 1100~1300 km。在图 10 中,我们比较了台风风速变化、路径变化与恩施台和昆明台记录到的地脉动振幅变化间的关系。比较结果表明:除台风 Rammasun 以外,其余五个台风均未引起明显的地脉动异常。说明这类远离中国海岸的西太平洋强台风对中国内陆的地脉动变化影响不明显。因此,台风 Rammasun 在中国内陆所产生大振幅的地脉动效应可能性较小。中国地震台网宽带地震仪广泛记录到的汶川大地震前的大幅度异常扰动可能是另有原因。

我们还注意到,汶川大地震期间的异常扰动持

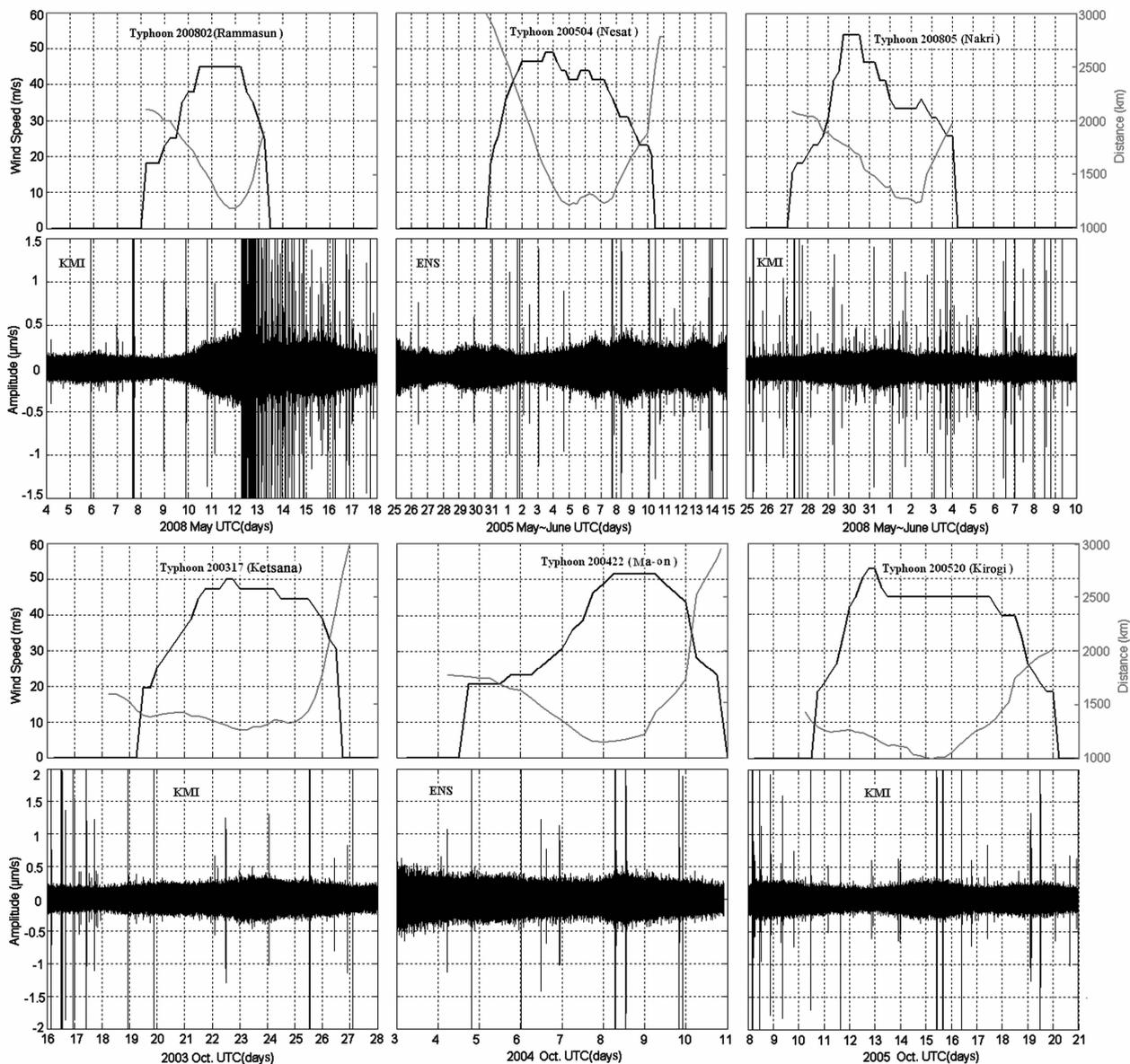


图 10 在台风 Nesat(200504), Nakri(200805), Ketsana(200317), Ma-on(200422)以及 Kirogi(200520)发生期间,昆明台或恩施台未记录到明显的异常扰动. 请注意这 5 个台风的路径和强度都与台风 Rammasun(200802)的路径和强度相似.

Fig. 10 No significant anomalous tremors were observed at station KMI or ENH during the typhoons Nesat(200504), Nakri(200805), Ketsana(200317), Ma-on(200422) and Kirogi(200520). Note that the tracks and strengths of the five typhoons are similar to these of Rammasun (200802).

续时间较长,扰动一直与大地震的余震相伴. 图 11 显示了西安台、恩施台、昆明台在 2008 年 5 月 1 日至 5 月 27 日期间记录到的地脉动信号. 由图可见:即使在 5 月 13 日后,汶川大地震和台风过程都已经完全结束,这些台记录到的地脉动信号仍然保持较大的振幅. 扰动从 5 月 10 日一直持续到 5 月 22 日,这种情况比较罕见,很难用台风影响进行解释.

另外,我们还发现在没有台风出现时,地震仪

也记录到异常扰动的情况. 例如 2003 年 6 月 7 日到 11 日恩施地震台记录到了一次明显的异常地脉动,但在此期间并未有任何台风事件发生. 值得注意的是在 6 月 9 日台湾宜兰发生了 $M_s 6.3$ 级地震. 图 12 显示宜兰地震“震前扰动”的振幅与 2003 年第 6 号台风 Soudelor 激发的地脉动振幅相当. 台风 Soudelor 为强台风,其最大风力达到 17 级时,台风中心距离温州海岸约 500 km. 这一实例告诉我们一

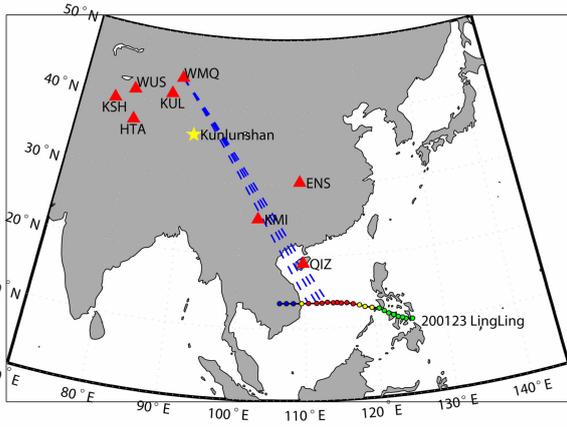


图 6 2001 年 11 月第 23 号台风 LingLing 的行动路径图
图中蓝线表示地震波从台风地脉动激发区域到乌鲁木齐台的大圆传播路径. 红色三角形标识符表示地震台的位置. 黄色星型标识符表示昆仑山大地震震中位置.

Fig. 6 The track of LingLing, the typhoon No. 23 in 2001
The blue lines show great circles connecting microseisms excitation region and seismograph at WMQ. The red triangle symbols mark locations of seismic stations. The yellow star marks the epicenter of the 2001 great Kunlunshan earthquake.

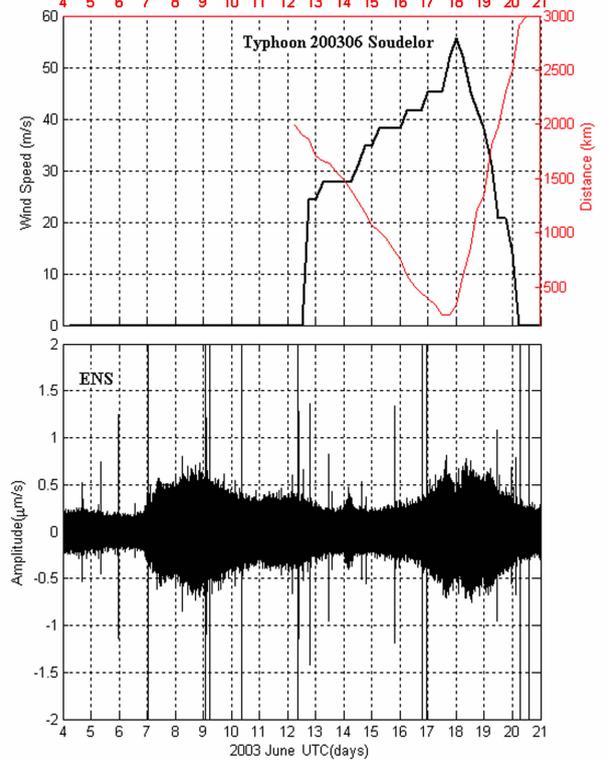
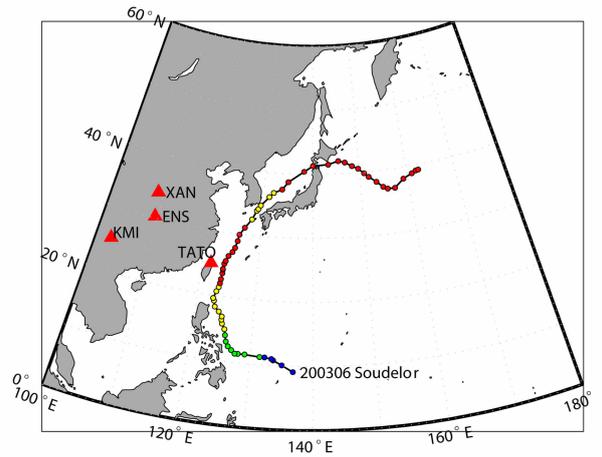


图 12 2003 年 6 月 9 日台湾宜兰 $M_s6.3$ 级地震发生前两天,恩施台(ENS)开始记录到了异常扰动,而此期间并无台风事件发生.由图可见:在 2~8 s 的周期段,宜兰地震“震前扰动”的振幅与 2003 年第 6 号台风 Soudelor 激发的异常扰动的振幅相当.图中红线表示台风中心到台湾西海岸的距离变化.
Fig. 12 Anomalous tremors were observed at ENH just before the $M_s6.3$ earthquake at Taiwan on June 9, 2003, and no typhoon was present during this period. The amplitudes of anomalous tremors before the earthquake are almost same as that of microseisms caused by Soudelor, the No. 6 typhoon in 2003. The red curve in the middle figure shows the variation of distance between the track of Soudelor and west coasts of Taiwan.

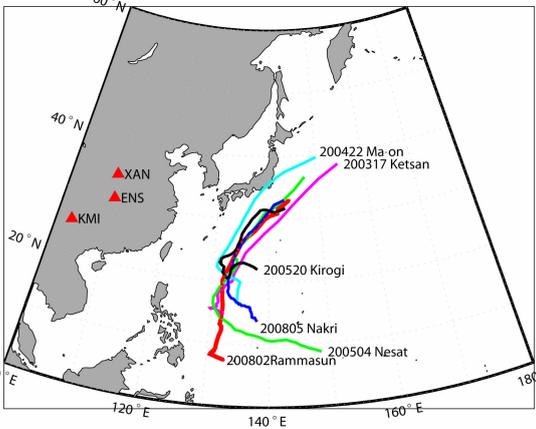


图 9 台风 Nesat (200504)、Nakri(200805)、Ketsana (200317)、Ma-on(200422)以及 Kirogi(200520)的路径和强度都与台风 Rammasun(200802)相似
Fig. 9 The tracks and strengths of typhoons Nesat (200504), Nakri(200805), Ketsana(200317), Ma-on (200422)and Kirogi(200520)are similar to that of typhoon Rammasun(200802)

些“震前扰动”现象与台风并无关系.

5 结 论

(1)利用小波方法可以从地震仪低频观测记录中提取高频窄带地脉动信号,从而可有效地对地脉

动信号进行时频分析.

(2)Higgins 海洋驻波理论可以较好地解释中国内地地震台站在强台风期间记录到的地脉动异常

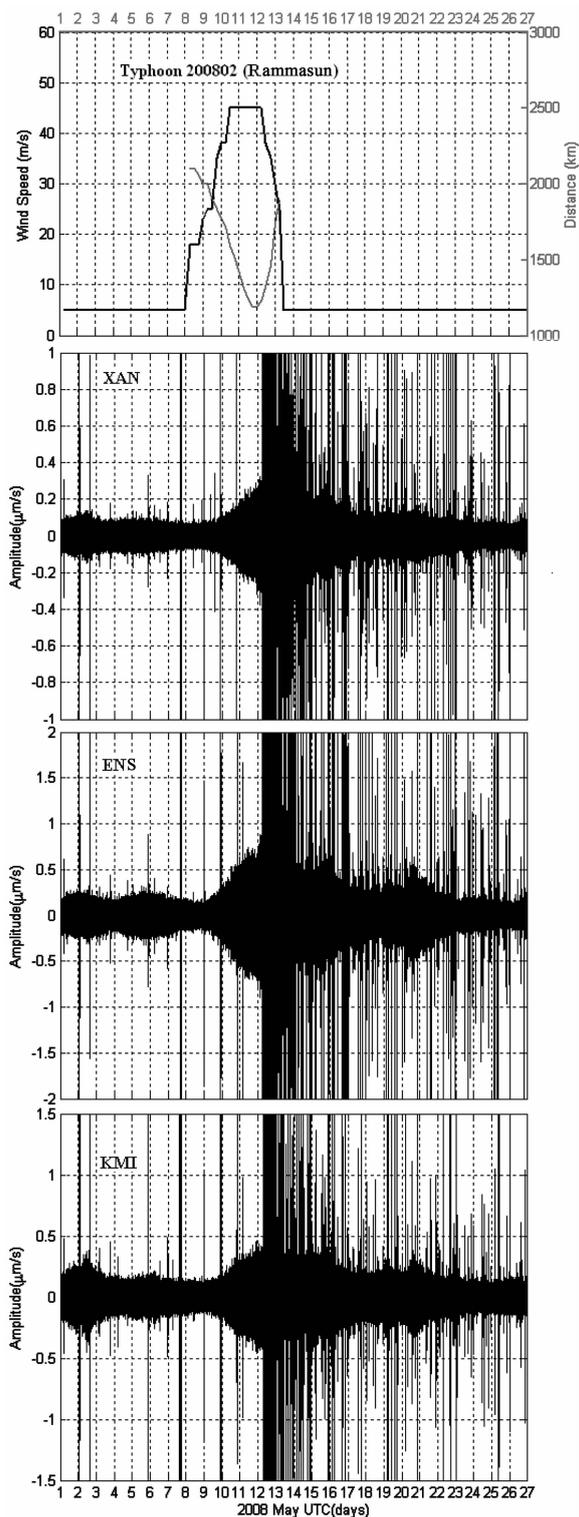


图 11 在 5 月 13 日后,台风 Rammasun 已经完全结束,西安台、恩施台、昆明台记录到的地脉动信号仍然保持较大的振幅,一直延续到 5 月 22 日。

Fig. 11 After May 13, the Rammasun is over. Anomalous tremors still could be observed at XAN, ENH and KMI, which lasted to May 22.

现象。靠近中国海岸的强台风会激发很强的地脉动,这种地脉动是由海浪驻波引起的次生脉动。次生脉

动所产生的地震波可在中国大陆传播很远,因而中国内陆的地震仪在近海台风发生期间可经常观测到异常地脉动,而远离中国海岸的强台风不会在中国内陆激发很强的地脉动。

(3)2001 年昆仑山大地震发生前,中国南海上空产生了一次强台风 LingLing. 由于 LingLing 发生在距离中国海岸较近的浅水海域上空,因此,中国内陆许多地震台站记录到的昆仑山大地震的“震前扰动”源于台风地脉动效应的可能性较大,但位于新疆地震台记录到的异常地脉动信号的频率明显低于其他地震台记录到的地脉动频率,这一现象值得我们进一步研究。

(4)汶川大地震发生期间,西太平洋上空产生的强台风 Rammasun 距中国海岸较远,分析历史上类似的台风过程,结果表明这类台风在中国内陆产生大振幅的地脉动效应可能性较小,而且在汶川大地震和强台风过程都已经完全结束后的一周内,地震仪仍可记录到较强的扰动信号,因此,中国内陆地震台站广泛记录到的汶川大地震的“震前扰动”完全源于台风地脉动效应的可能性较小。

(5)在没有台风出现时,地震仪也有记录到大振幅异常扰动的情况,因此,汶川大地震的“震前扰动”产生的地点、原因、机理等问题值得我们去进行深入的探讨和研究,探索这些异常扰动能否为今后地震预报提供有用的信息。

致谢 感谢中国地震局台网中心提供宽带地震仪观测数据,中央气象台提供台风数据。

参考文献(References)

- [1] 郝晓光,胡小刚,许厚泽等. 汶川大地震前的重力扰动. 大地测量与地球动力学,2008,28(3):129~131
Hao X G, Hu X G, Xu H Z, et al. Gravity disturbance before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2008, 28(3):129~131
- [2] 郝晓光,胡小刚. 宽带地震仪资料证实汶川大地震“震前重力扰动”. 地球物理学进展,2008,23(4):1332~1335
Hao X G, Hu X G. Disturbance before the Wenchuan earthquake by broadband seismometer. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, 23(4):1332~1335
- [3] 胡小刚,郝晓光. 汶川大地震宽带地震仪短临异常及成因初探. 地球物理学报,2008,51(6):1726~1734
Hu X G, Hao X G. The short-term anomalies detected by broadband seismographs before the May 12 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(6):1726~1734
- [4] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelet. *Communications on Pure and Applied Mathematics*,

- 1988, **41**:909~996
- [5] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. CBMS-NSF Series in Applied Mathematics, SIAM, Philadelphia, 1992
- [6] Mallat S. Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of $L^2(R)$. *Transactions of the American Mathematical Society*, 1989, **315**:69~87
- [7] Mallat S. A theory for multiscale signals decomposition; the wavelet representation. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**:674~693
- [8] Smith M, Barnwell T. Exact reconstruction for tree-structured subband coders. *IEEE Transaction on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1986, **34**:431~441
- [9] Longuet-Higgins M S. A theory of origin of microseisms. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 1950, **243**:1~35
- [10] Hasselmann K A. A statistical analysis of the generation of microseisms. *Rev. Geophys.*, 1963, **1**:177~209
- [11] Tanimoto T. Excitation of normal modes by nonlinear interaction of ocean waves. *Geophys. J. Int.*, 2007, **168**:571~582, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03240.x
- [12] Tanimoto T. Excitation of microseisms. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**, L05308, doi:10.1029/2006GL029046
- [13] Haubrich R A, McCamy K. Microseisms: coastal and pelagic sources. *Rev. Geophys.*, 1969, **7**(3):539~571
- [14] Bromirski P D, Duennebie F K. The near-coastal microseism spectrum: spatial and temporal wave climate relationships. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107** (B8): 2166, doi: 10.1029/2001JB000265
- [15] Bromirski P D, Duennebie F K, Stephen R A. Mid-ocean microseisms. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2005, **6**, Q04009, doi:10.1029/2004GC000768
- [16] Gerstoft P, Tanimoto T. A year of microseisms in southern California. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**, L20304, doi:10.1029/2007GL031091
- [17] 杨又陵, 赵根模, 高国英等. 2001年11月14日昆仑山口西 M8.1 地震前的缓慢地震事件. *国际地震动态*, 2003, **9**:1~4
 Yang Y L, Zhao G M, Gao G Y, et al. The slow earthquake event occurring before west to Kunlun Mountain Pass earthquake of $M_{\text{s}}8.1$ on November 14, 2001. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), 2003, **9**:1~4

(本文编辑 何 燕)