

胡小刚, 郝晓光, 薛秀秀. 汶川大地震前非台风扰动现象的研究. 地球物理学报, 2010, **53**(12): 2875~2886, DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 12. 011

Hu X G, Hao X G, Xu X X. The analysis of the non-typhoon-induced microseisms before the 2008 Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(12): 2875~2886, DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 12. 011

汶川大地震前非台风扰动现象的研究

胡小刚, 郝晓光*, 薛秀秀

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 为了区分汶川大地震的震前扰动现象中的台风因素和非台风因素, 本文研究了中国大陆宽带地震仪在汶川大地震前记录到的异常扰动信号的时频特征. 研究结果表明汶川大地震的震前扰动主要由两种扰动构成, 二者动态特征完全不同. 其中优势频率为 0.2~0.25 Hz 的扰动主要与台风 Rammasun 有关. 这种台风扰动在沿海地区较强, 在内陆地区较弱, 其震源在靠近台风运动路径的海底. 另一种优势频率为 0.1~0.18 Hz 的扰动与台风无关, 这种非台风扰动在地震发生前约 10 h 突然急剧增强, 其最大值出现在地震爆发时刻. 非台风扰动在靠近震中的地区较强, 在沿海和西部地区较弱. 震源扰动扫描算法计算初步定位的结果显示其震源不在海底, 而是分散在震中附近的内陆地区. 汶川大地震前的非台风扰动是否与汶川大地震有关, 值得进行更深入的研究.

关键词 汶川大地震, 震前扰动, 台风扰动, 非台风扰动

DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 12. 011

中图分类号 P315

收稿日期 2009-11-05, 2010-11-30 收修定稿

The analysis of the non-typhoon-induced microseisms before the 2008 Wenchuan earthquake

HU Xiao-Gang, HAO Xiao-Guang*, XUE Xiu-Xiu

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

Abstract To distinguish typhoon and non-typhoon effects on the tremor before the 2008-05-12 great Wenchuan earthquake, we investigate microseisms recorded by broadband seismographs in mainland of China before the earthquake. Our results indicate that the microseisms consist of two main parts that show different dynamical characters. The one in the frequency band of 0.2~0.25 Hz is related to typhoon Rammasun, which is strong near the coast of East China but weak in the inland of China, and its seismic source is located on the seabed near the track of Rammasun. The other one in the frequency band of 0.1~0.18 Hz bore no relation to Rammasun. This non-typhoon-induced microseism is strong near the epicenter of the earthquake but weak in the coast and western areas of China. Locating seismic sources of non-typhoon-induced microseism by the source scanning algorithm, we show that the sources are distributed around the epicenter of Wenchuan.

Keywords The 2008 great Wenchuan earthquake, Tremor before large earthquake, Typhoon-induced microseisms, Non-typhoon-induced microseisms

基金项目 国家自然科学基金项目(40774011, 90814009, 40874036)资助.

作者简介 胡小刚, 男, 1963 年生, 副研究员, 主要研究方向为地学信号处理与分析. E-mail: hxg432@whigg. ac. cn

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

1 引言

2008年5月12日8.0级汶川大地震发生后,郝晓光和胡小刚等^[1~3]最先指出汶川大地震发生前存在约48 h的震前扰动现象.然而在此期间西太平洋上空恰好产生了一次台风(200802号台风,国际命名为Rammasun).因此一些学者据此认为这种震前扰动现象与台风Rammasun相关,而与汶川大地震毫无关系.

海洋激发地球微地震(microseisms)的根本原因是由于海浪冲击海底引起海底压力变化.根据流体力学原理,海浪行波对海底的压强随海水深度的增加而呈指数衰减.因此海浪行波造成的微地震——原生微地震(Primary microseisms)较弱.根据英国海洋学家Languet-Higgins等的研究^[4~6],在台风或海啸发生期间,海上风暴激发的海浪之间发生非线性耦合作用,形成海浪驻波(其频率大约是海浪频率的两倍).海浪驻波的压强不随海水深度的增加而衰减.因此海浪驻波可引发很强的微地震——二次微地震(Secondary microseisms).二次微地震波的能量远大于原生微地震的能量,可达到其100倍左右^[6].二次微地震产生的地震波频率大约是海浪频率的两倍,主要以瑞利波的形式传播,可在远离海洋数千公里的内陆地震仪上引起明显的异常扰动信号.这是目前国际学术界公认的海上风暴期间大陆地震仪器记录到异常地脉动信号的主要原因^[7,8].

文献[9~11]研究了震前扰动与台风的关系,结果表明:汶川大地震的震前扰动的某些现象与台风引起的异常地脉动密切相关.但是,通过对扰动信号时频特征的细致分析后,还发现:中国内陆地震仪记录到的汶川大地震的震前扰动表现出一些异常现象,这些异常现象难以用海浪激发微地震的理论进行合理的解释.本文针对汶川大地震的震前扰动中的异常现象进行深入的分析和研究.

2 汶川大地震震前扰动中的异常现象

2008年5月7~13日,西太平洋上空产生了强台风Rammasun.根据中央气象台的报道:Rammasun于5月7日在棉兰老岛以东约790 km处形成,在5月8日增强为强热带风暴,在5月9日进一步增强为台风,随后风暴中心向偏北方向移动,

逐渐形成强台风.在5月11日,Rammasun的风力达到最大,其中心风力达14级(45 m/s),7级风圈半径达450 km.此后,Rammasun的风力逐渐减弱,于5月13日在日本海附近转化为温带气旋.特别值得注意的是:Rammasun距离中国海岸很远,台风中心的移动路径距离台湾最近处约1200 km,中国大陆海岸最近之处也有1300余公里(移动路径可参见图1),Rammasun未对中国沿海地区造成任何气象影响.

台风在浅海区域上空时,台风浪与海底、海岸碰撞摩擦后形成强烈的反射浪.逆行的反射浪与海浪非线性耦合后形成很强的海浪驻波,驻波冲击海底从而激发强烈的微地震.深海区域缺乏形成逆行浪的条件,因而难以形成强烈的海浪驻波.相对浅海区域,深海区域台风浪激发的微地震较弱^[12].而且由于远海台风激发的微地震的震源距离大陆较远,远离海洋的内陆地震仪很难清晰地记录到远海台风激发的异常扰动信号.文献[9]中分析了历史上5个路径和强度类似于Rammasun的台风事件,这些台风事件都未直接在中国内陆台站引起明显的异常扰动信号,唯独Rammasun是个例外(参见文献[9]的图9,10).这一异常现象引起了我们的关注.

仔细比较中国沿海地震台与远离海洋的内陆地震台记录中的汶川大地震震前扰动信号,可发现二者的波形有明显的区别(图1).图1显示沿海地震台记录中的震前扰动信号的最大值出现在5月11日——台风最强且距离海岸较近的时候;而内陆地震台记录中的震前扰动信号的最大值却出现在5月12日14时28分——汶川大地震爆发的时刻.以成都台和泉州台为例,在5月11~12日台风Rammasun活动期间,到达成都台的微地震波(瑞利波)恰好经过或靠近泉州台(图1).成都台和泉州台相隔约1670 km,但成都台记录中的扰动峰值与泉州台记录中的扰动峰值间却有20多小时的时间差.这一显著的传播延迟现象难以用地震波动学知识进行解释.台风激发的微地震的波动主要成分是瑞利面波,在5~10 s的周期范围,理论上瑞利面波在匀质介质中的传播速度大约为3 km/s,这样的传播速度在成都台和泉州台间形成的传播延迟也不过10 min.瑞利面波在实际传播的过程中,其速度会受到非均匀介质结构和性质的影响,记录地震波的地震仪也会受到台站地质结构和接收条件的影响.所以对同一台风,不同台站上观测到的脉动异常的形态和频谱结构可能会有所不同.但即使考虑到其他地质环

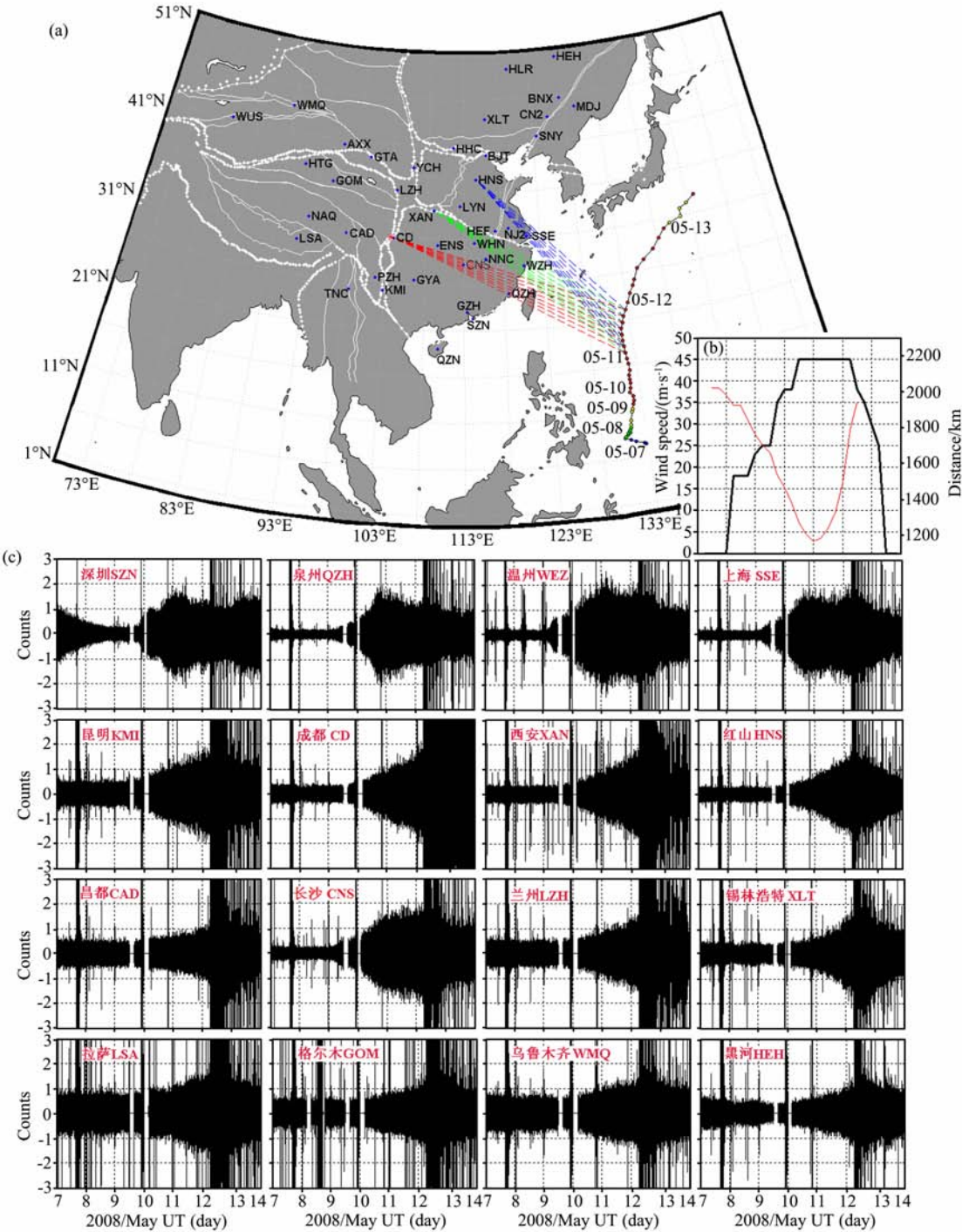


图 1 台风 Rammasun 发生期间,沿海和内陆台站记录的微地震波存在较大差异
(a) 图中红色、绿色和蓝色虚线分别表示在 5 月 11 日台风 Rammasun 激发的地震波经过成都台、西安台和红山台时的传播路径,位于沿海地区的泉州台、温州台和上海台分别靠近这些路径;(b) Rammasun 风速变化图,图中黑线表示台风风速的时序变化,红线表示台风路径到台湾东部的距离变化;(c) 中国大陆地震台站在 4~16 s 周期段记录到的微地震。内陆台和沿海台记录到的微地震波形有明显的区别,沿海台记录到振幅最大值出现在 5 月 11 日—Rammasun 最强且距离中国海岸最近的时候,内陆台记录到的振幅最大值出现在 5 月 12 日—汶川大地震爆发的时刻。

Fig. 1 Dissimilar in shape of microseismic waveforms at coastal stations and distant land stations
(a) The track of the typhoon Rammasun. The red dashed lines indicate that microseismic waves pass through station CD are also close to QZH, so do the similar situations for XAN, WEZ (green lines) and HNS, SSE (blue lines). (b) Wind-speed variation of Rammasun. The red line shows the distance between the eye of typhoon and station TATO. (c) Microseism waves in period band of 4~16 s. Microseismic waveforms recorded at coast stations are significant different these at inner-land stations. The maximum amplitudes recorded at the coast stations appear at May 11—when Rammasun is strongest and nearest to the coast of China. The maximum amplitudes recorded at the inner-land stations appear at May 12—when the great earthquake outbreak.

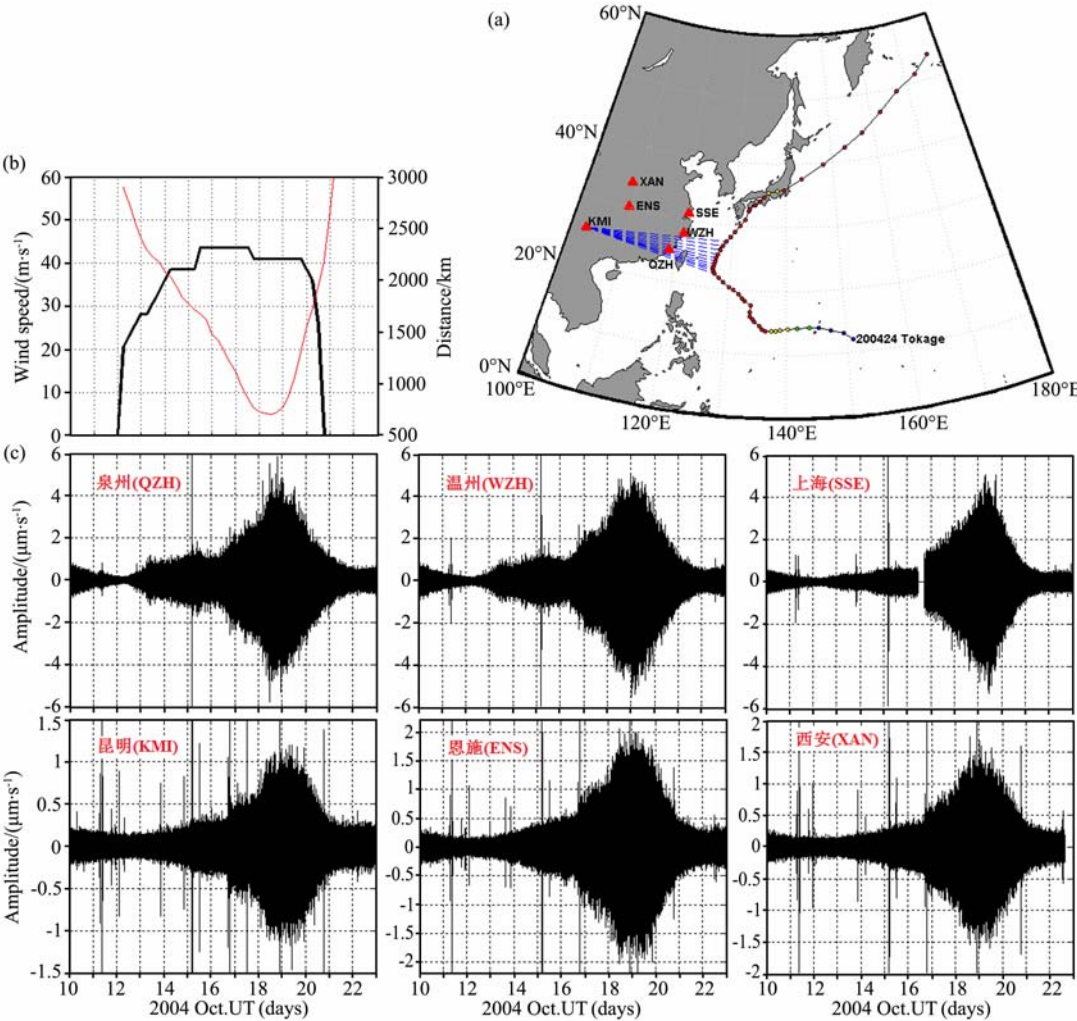


图 2 2004 年第 24 号台风 Tokage 激发的微地震

(a) 台风 Tokage 的轨迹,图中蓝色虚线表示台风激发的地震波经过昆明台(KMI)时的传播路径,位于沿海地区的泉州台(QZH)靠近这些路径;(b) Tokage 风速变化图,图中黑线表示台风风速的时序变化,红线表示台风路径到大陆海岸的距离变化;(c) 泉州、温州、上海、西安、恩施、昆明地震台站在 4~16 s 周期段记录到的微地震信号。内地台站与沿海台站记录到的微地震波形非常相似,其间没有异常大的传播延迟。

Fig. 2 Microseisms generated by the 2004 No. 24 typhoon Tonkage

(a) The track of the typhoon Tonkage. The blue dashed lines indicate that microseismic waves pass through station KMI are also close to QZH, so do the similar situations for XAN, WEZ (green lines) and HNS, SSE (blue lines); (b) Wind-speed variation of Rammasun. The red line shows the distance between the eye of typhoon and station TATO; (c) Microseism waves in period band of 4~16 s. Microseismic waveforms recorded at coast stations QZH, WEZ and SSE are similar to these at inner-land stations KMI, ENS and XAN.

境的影响,瑞利面波也难以在相距 1000~2000 km 两地造成 20 多小时的传播延迟。我们对大量观测结果的分析表明:对于单纯由台风海浪引起的微地震,中国内地地震台与沿海地震台记录到的震动波形较为相似,二者的记录也没有显示出异常大的传播延迟(图 2)。台风 Rammasun 期间沿海台和内地台之间地震面波异常大的传播延迟现象提示我们:汶川大地震的震前扰动不会单纯源于台风 Rammasun 的影响,其中很可能包含着其他非台风因素的影响。

3 汶川大地震震前扰动中的台风扰动和非台风扰动

针对汶川大地震震前扰动的异常现象,我们细致分析了全国 200 多个国家和地方台站的宽带地震仪在汶川地震前的观测数据。这些台站的震前扰动观测数据的时频特征显示:汶川大地震震前扰动主要由两种扰动构成,两者有着完全不同的动态特征。

下面以成都台和泉州台的观测数据为例,介绍这些观测数据时频特征的过程. 首先考虑垂直方向观测数据. 这两个台的观测数据采样频率为 50 Hz. 根据采样定理,观测记录的 Nyquist 频率为 25 Hz. 通常西太平洋台风在中国大陆激发的异常地脉动的信号频率范围为 0.15~0.25 Hz^[9]. 将地震前连续 30 个小时观测记录分三段,每段长度为 10 h,然后对每段数据进行能量谱密度分析(Power Spectral Density, PSD). 分析结果显示在地震前 30 h,泉州台的记录显示频率范围为 0.2~0.25 Hz 的扰动信号的能量开始迅速减弱(图 3),而一种频率范围为 0.1~0.18 Hz 的低频扰动信号在地震发生前 30 h 却在迅速加强. 由于台风扰动对成都台的影响较弱,这种低频扰动信号在成都台的记录中尤为显著(图 3).

进一步以地震发生前每小时的记录为分析研究对象,对震前扰动信号进行更细致的时频分析. 考虑

汶川地震爆发前 90 个小时的连续观测数据,对其中每小时的数据进行 PSD 分析,然后分别在 0.1~0.18 Hz 频段和 0.2~0.25 Hz 频段求出 PSD 振幅变化的平均值,最后得到两种扰动能量变化的时间序列. 图 4 显示两种扰动的能量变化表现出完全不同的动态特征. 优势频率为 0.2~0.25 Hz 的扰动与台风的路径和强度变化相关,该扰动始于 5 月 9 日,其最大值出现在 5 月 11 日(台风距离中国大陆最近),随后其能量随着台风的远离而逐渐减弱,因此这种扰动是海浪驻波引发的二次微地震(Secondary microseisms),是一种台风扰动现象. 而优势频率为 0.1~0.18 Hz 的扰动始于 5 月 10 日,并一直缓慢增强,但其能量在地震发生前约 10 h 突然开始急剧增强,其最大值出现在地震爆发时刻,此时的能量明显大于台风扰动的能量. 这种扰动与台风的路径和强度变化不相关,明显是一种非台风扰动. 图 4 显示台风扰动信号在泉州地震台的记录中很强,而非台

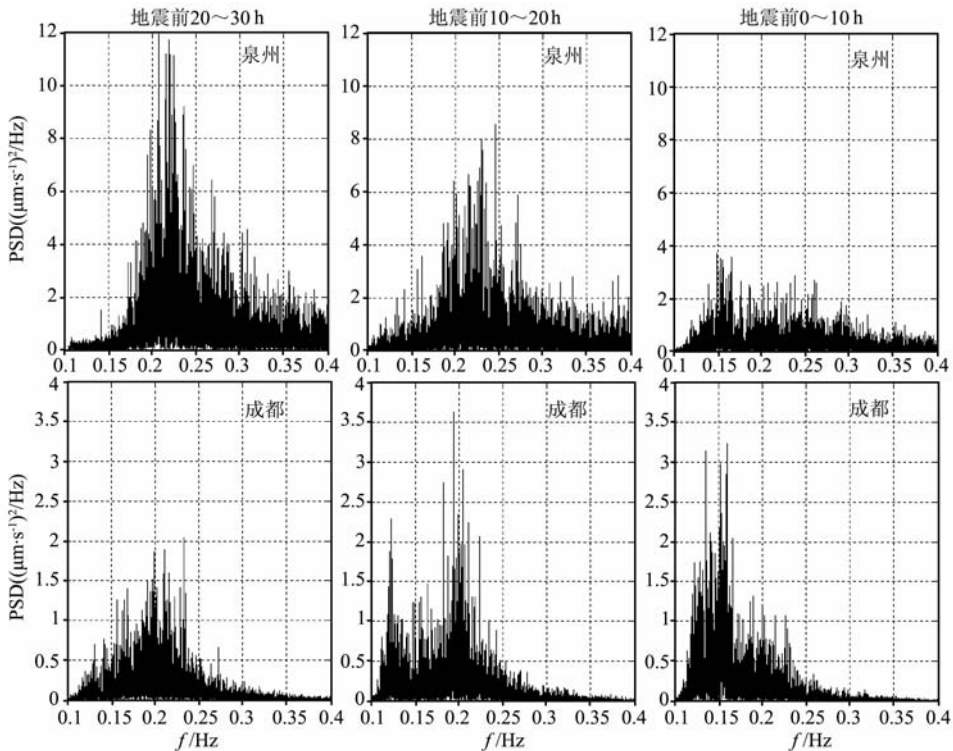


图 3 汶川地震爆发前,成都台和泉州台观测记录的短时 PSD 变换

将地震爆发前连续 30 h 的观测记录分三段,每段 10 h,然后对每段数据进行 PSD 分析. 泉州台的记录显示台风扰动(频率范围为 0.2~0.25 Hz)的能量从地震发生前 30 h(5 月 11 日)开始迅速减弱,成都台显示另一种低频扰动(频率范围为 0.12~0.17 Hz)的能量在不断加强,在地震发生前 10 h 达到最大.

Fig. 3 The short-time PSD analysis of the seismic records from stations CD and QZH

The 30 h seismic records before the breakout of great Wenchuan earthquake are cut into three equal parts, and PSD analysis is applied to each 10 h part. The analysis show that at QZH the energy of typhoon-induced microseism (in 0.2~0.25 Hz) has decreased since 30 hours before (on May 11) the earthquake, but at CD the energy of microseism (in 0.12~0.17 Hz) has increased, and it goes up to its maximum value at 10 h time window just before the earthquake.

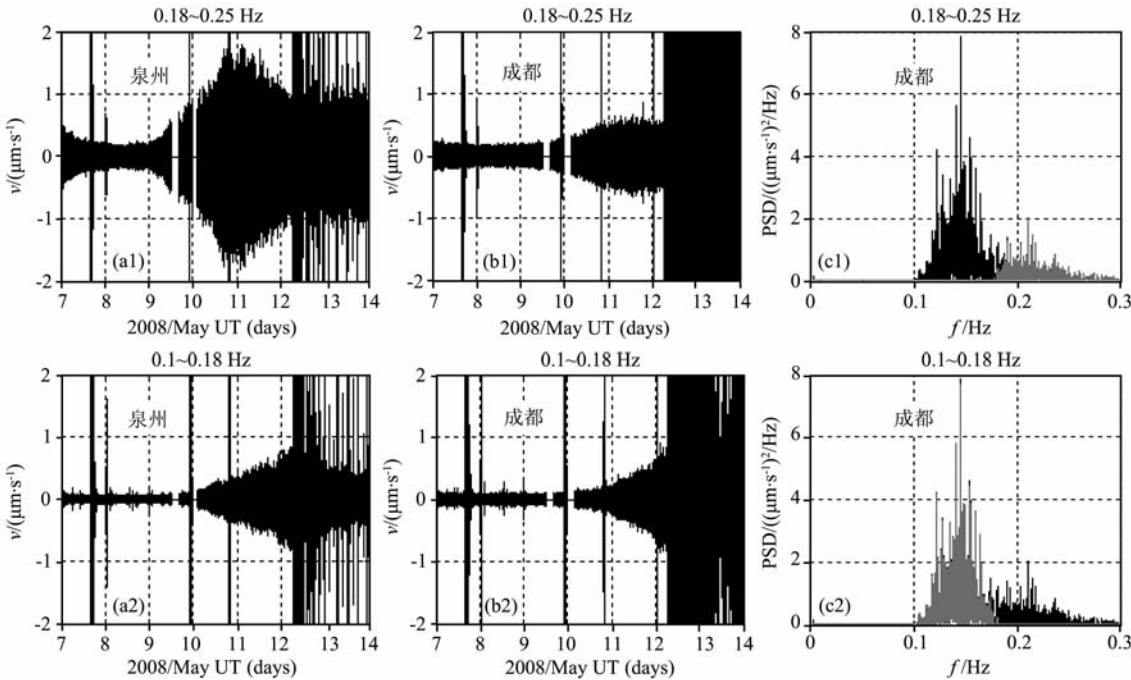


图 5 时间域分离台风扰动和非台风扰动

用带通滤波器将台风扰动与非台风扰动在时间域分开;(a1,a2) 泉州台记录到的台风扰动和非台风扰动;(b1,b2) 成都台记录到的台风扰动和非台风扰动;(c1,c2) 成都台观察数据滤波前后的 PSD 变换,变换时所用的时间窗为地震发生前 2 h.图中黑色图形为未滤波数据的 PSD 变换,灰色图形为滤波后的 PSD 变换.比较的结果表明滤波器可有效地将台风扰动与非台风扰动在时间域分开.

Fig. 5 Separating the typhoon- and non-typhoon induced microseism in the time domain

Typhoon- and non-typhoon microseisms are separated in the time domain by bandpass filters. (a1,a2) Typhoon microseisms (in 0.18~0.25 Hz) and non-typhoon microseisms (in 0.12~0.18 Hz) at QZH station; (b1,b2) The similar case at CD station. (c1,c2) PSD transform for records of CD before and after filtering (in grey). The time window is 2 h before the earthquake. The comparison indicates that the filters can efficiently separate the two microseismic signals in the time domain.

风扰动在成都台的记录中特别突出.成都台和泉州台宽带地震仪的水平观测数据也表现出相同的特征.

用带通滤波器将台风扰动和非台风扰动信号在时间域分开,图 5 显示台风扰动信号在成都台很弱,其最大值也不在地震爆发时刻.值得注意的是:在 0.1~0.18 Hz 频段,成都台和泉州台之间异常大的传播延迟现象消失了,两个相距 1670 km 的地震台记录到的非台风扰动波形非常相似(图 5).这一结果证实本文的推测:汶川大地震震前扰动异常大的传播延迟现象是由于存在非台风扰动的影响.

采用相同的方法分析和研究四川、重庆、甘肃、陕西、湖北、湖南、浙江、广东、福建、新疆、西藏、台湾等 200 多个地方台站和国家台站的宽带地震仪的观测数据,PSD 分析结果显示这些台站都在 0.2~0.25 Hz 频段记录到了 Rammasun 激发的台风扰动,在 0.1~0.18 Hz 频段记录到了非台风扰动,但扰动的信号强度随地域的不同而有较大的区别.特别值得注意的是:相对于台风扰动信号,非台风扰动

信号在中国大陆内陆地区较强,特别是在靠近震中的四川、重庆、甘肃、陕西以及湖北地区.在这些地区的观测记录中,非台风扰动在地震爆发前 10 h 的急剧增强,其能量明显大于台风扰动能量,在地震爆发前的 1~4 h,非台风扰动的能量大约是台风扰动能量的 2~3 倍(图 6);而在沿海地区,非台风扰动相对于台风扰动的优势并不明显,在中国大陆西部地区,非台风扰动也相对较弱(图 6).在湖北黄梅台的宽带倾斜仪记录中,非台风扰动表现出更为明显的优势,其记录显示在地震爆发前 4 个小时,非台风扰动的能量几乎是台风扰动能量的 4~5 倍(图 7).这些现象表明非台风扰动的震动源不在海底或沿海区域,而可能在靠近汶川大地震震中的内陆区域.

4 汶川大地震前非台风扰动现象的讨论

汶川大地震前的非台风扰动明显不同于 Rammasun 激发的台风扰动.非台风扰动在地震前 10 h 开始急剧增加,其最大值出现在地震爆发时

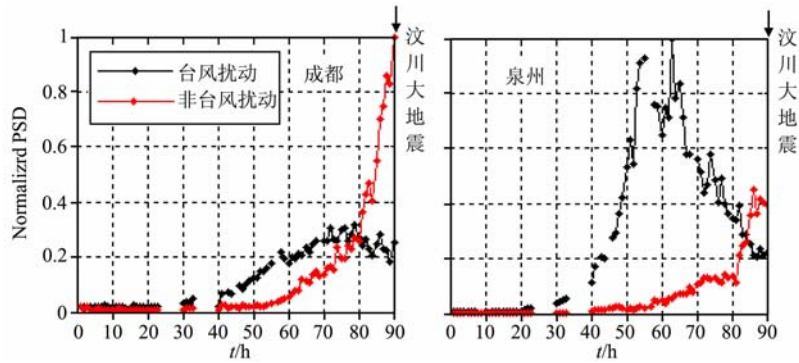


图 4 成都台和泉州台观察记录中台风扰动和非台风扰动的能量变化

将地震爆发前连续 90 h 的观测记录分为 90 个时段,每个时段长度为 1 h.对每个时段的数据进行 PSD 分析,求出每个时段信号在 0.12~0.17 Hz 频段和 0.2~0.25 Hz 频段内能谱密度(PSD)振幅的平均值,得到两种扰动信号能量随时间变化的时序图.图中显示台风扰动和非台风扰动表现出完全不同的动态特征.非台风扰动的能量在地震爆发前 10 h 突然急剧增加,并在地震爆发前 1 h 达到最大.图中时间范围为汶川大地震爆发前的 90 个小时,第 90 h 后地震爆发.

Fig. 4 The short-time PSD analysis of the 90-hour records at stations CD and QZH

The 90 h seismic records before the Wenchuan earthquake are cut into 90 equal parts. PSD transform is applied to each one-hour part and the hourly variable energy spectra are calculated in the band 0.12~0.18 Hz and 0.18~0.25 Hz, respectively. The energy change of microseisms in 0.18~0.25 Hz is related to the typhoon Rammasun. The energy change of microseisms in 0.12~0.18 Hz (red one) is not related to the typhoon. It starts a dramatic increase 10 h before the earthquake and is up to its maximum one hour before the origin time.

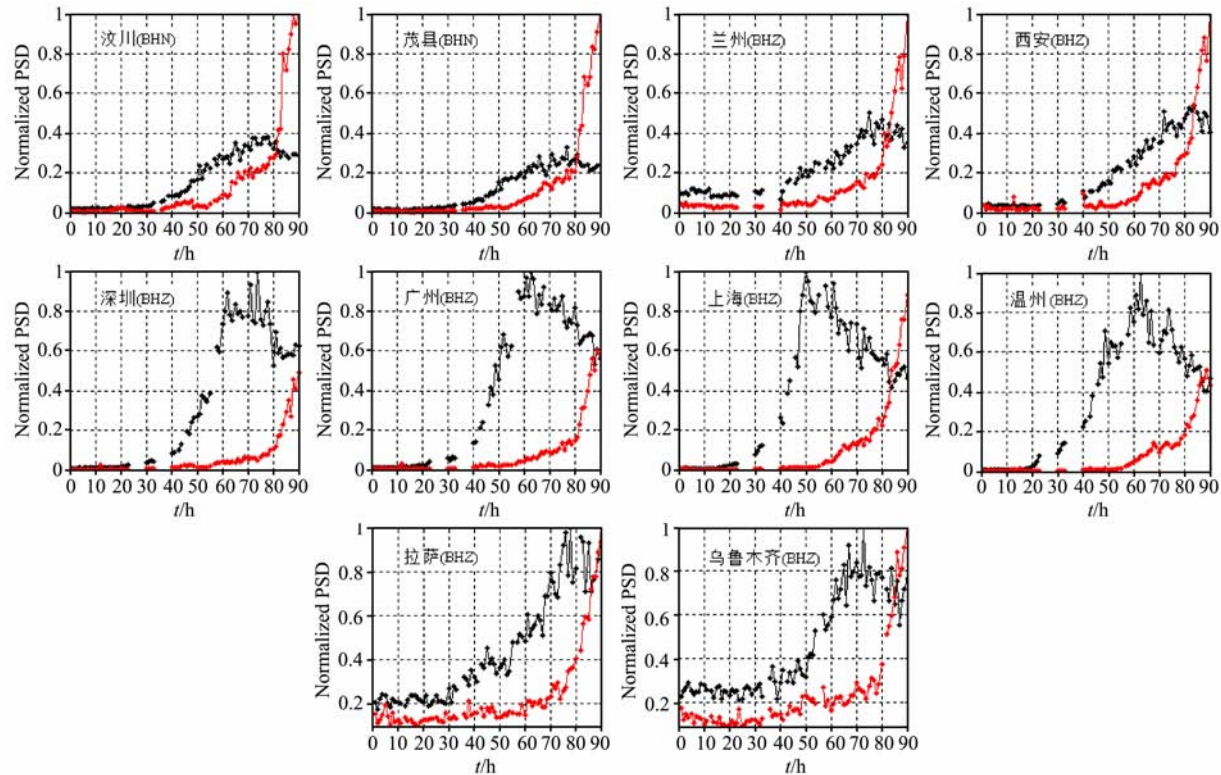


图 6 不同地震台记录中汶川地震前台风扰动和非台风扰动的能量变化

PSD 分析表明,不同地震台记录的非台风扰动信号的能量在地震前 10 个小时开始急剧增强,其信号能量在地震爆发时达到最大.在靠近震中的地震台,非台风扰动信号的能量明显大于台风扰动能量.而在沿海地区和中国大陆西部地区,非台风扰动相对于台风扰动的优势并不明显.台风扰动信号能量变化在不同台站略有不同,依赖于台站与台风路径的距离.图中 PSD 振幅为归一化后的值,时间范围为汶川大地震爆发前的 90 个小时.

Fig. 6 The energy variations of typhoon and non-typhoon microseisms at seismic stations

The energy of non-typhoon microseism signals is starts to dramatically increase 10 hours before the earthquake and reaches to the maximum at the origin time the earthquake. The energy of non-typhoon microseism signals is obviously larger than that of typhoon microseism signals at seismic station near epicenter, but not at coastal stations and stations in far-west China. Energy variations of typhoon microseism signals are a little different at seismic stations far away apart, depending on distances between the typhoon track and stations.

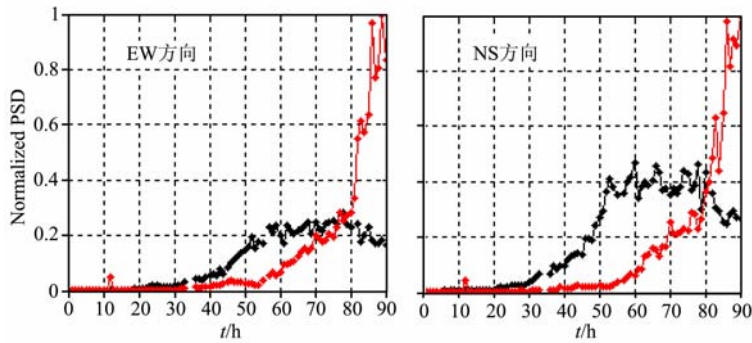


图 7 湖北黄梅台宽带倾斜仪记录中台风扰动和非台风扰动

湖北黄梅地震台距离震中 1039 km. 在黄梅台宽带倾斜仪记录中,“非台风扰动”的优势更为明显. 地震爆发前 4 个小时,东西方向的记录显示“非台风扰动”的能量大约是“台风扰动”能量的 4~5 倍. 图中振幅为归一化后的值,时间范围为汶川大地震爆发前的 90 个小时.

Fig. 7 The typhoon- and non-typhoon microseisms recorded by a tiltmeter
Significant non-typhoon microseism signal is recorded by a tiltmeter at station Huangmei, which is near the epicenter about 1039 km. The energy of non-typhoon-induced microseism in E-W component is 4~5 times of the energy of typhoon microseisms during 4 hours before the origin time.

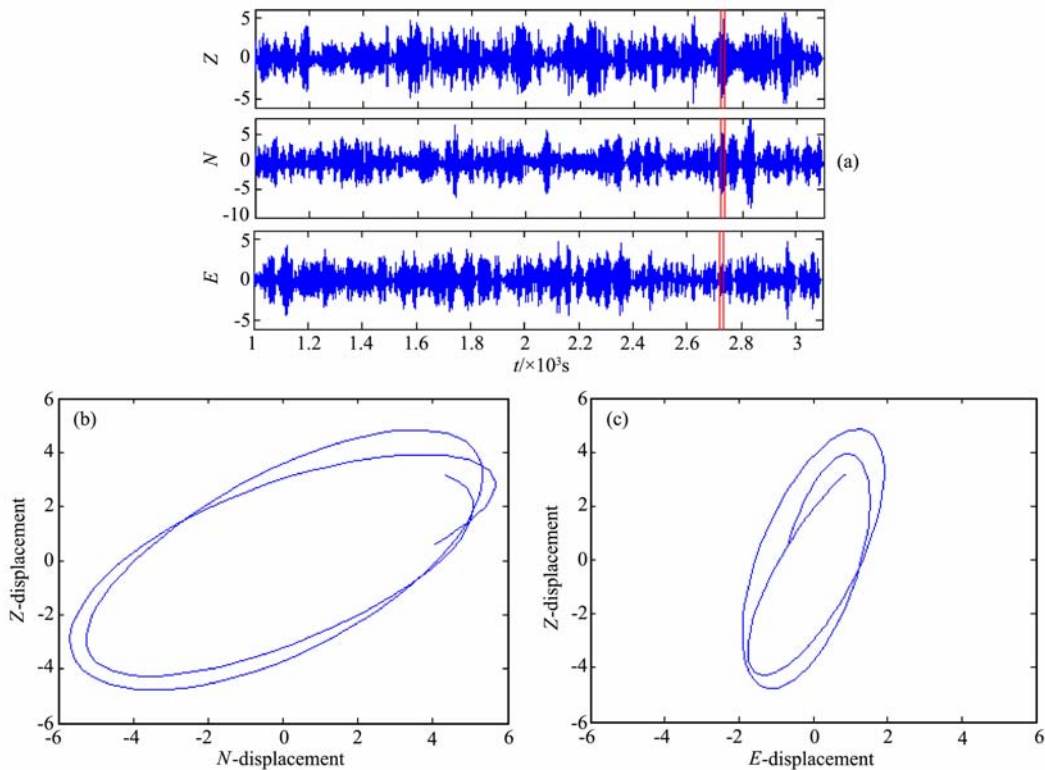


图 8 汶川大地震前的“非台风扰动”的主要成分为瑞利面波

(a) 四川地震局汶川台在汶川大地震发生前记录到的“非台风扰动”对应的震动位移. 图中红线间的记录用于分析质点的运动规律, 其时间长度为 15 s; (b) 质点在 Z-N 平面的运动轨迹; (c) 质点在 Z-E 平面的运动轨迹.

Fig. 8 Rayleigh waves is the main component of the non-typhoon microseisms

(a) Microseismic particle motion recorded at Wenchuan station. The waveforms between red lines are used for studing tracks of particle motion. time windows is 15 s. The particle motion in Z-N plane (b) and Z-E plane (c) is elliptical.

刻. 非台风扰动在靠近震中的地区较强, 在沿海地区和西部地区较弱. 从现象分析上看, 这种非台风扰动似乎应该与汶川大地震有一定的联系. 究竟是什么因素导致在内陆地区产生这种异常扰动, 且刚好发生在汶川大地震爆发前? 这些问题值得进一步的思考和

研究.
分析表明, 汶川大地震前的非台风扰动对应的地面质点运动主要为垂直平面内的逆行椭圆运动(图 8). 而波动质点的椭圆运动正是瑞利面波的基本特征. 因此, 汶川大地震前的非台风扰动产生的地震波

的主要成分也为瑞利面波. 在确定了非台风扰动的波动成分后, 利用四川、重庆、甘肃、陕西、湖北地区的宽带地震仪观测数据, 采用扰动源扫描算法^[13~15]对汶川大地震前的台风扰动和非台风扰动的震动源进行了初步的定位计算. 结果表明: 台风扰动的震动源位置分散在靠近台风路径的海底, 并随台风的移动而改变(图 9, 10). 这个定位结果完全符合 Languet-Higgins 等人的理论分析结果^[4~6]. 非台风扰动的震动源位置也不局限在一点, 而是分散在靠近震中的内陆地区(图 11)(限于篇幅, 有关定位的详细内容将另文发表). 台风扰动是海浪引起海底压力变化而造成的微地震, 产生的地震波的主要成分为瑞利面波^[8, 16]. 那么汶川大地震前的非台风扰动是否和地震爆发前的地下压力变化有关呢?

从板块运动的宏观尺度分析, 印度板块推挤欧亚板块是导致汶川大地震爆发的根本原因. 印度洋板块

向北运动挤压欧亚板块形成了青藏高原, 并造成青藏高原深部的物质向东流动. 东流物质遇到四川盆地受阻后向上运动, 形成了绵延几百公里的龙门山脉和龙门山断裂带. 汶川大地震是龙门山断层逆冲运动的结果. 只有在地下强大的水平方向压力的作用下, 才会出现逆冲断层型的断层运动^[17]. 逆冲型断层多出现在海洋俯冲带附近, 在大陆地区极为少见. 汶川大地震发生在内陆地区, 但却具有和海洋俯冲带地震一样的逆冲特点. 这是汶川大地震和绝大多数大陆地震不同的地方, 也是通过研究汶川地震理解大陆动力学有重要意义^[18]. 近年来许多观测显示, 在一些海洋俯冲带附近, 如卡斯卡迪亚俯冲带, 菲律宾俯冲带, 南海(Nankai)俯冲带, 沿俯冲带板块边界经常出现一些微弱的低频扰动现象. 与此同时 GPS 观测到了板块的缓慢滑动现象. 因而一些学者推测这类扰动现象的产生可能与板块下液态物质的运动, 或者与板块滑动时

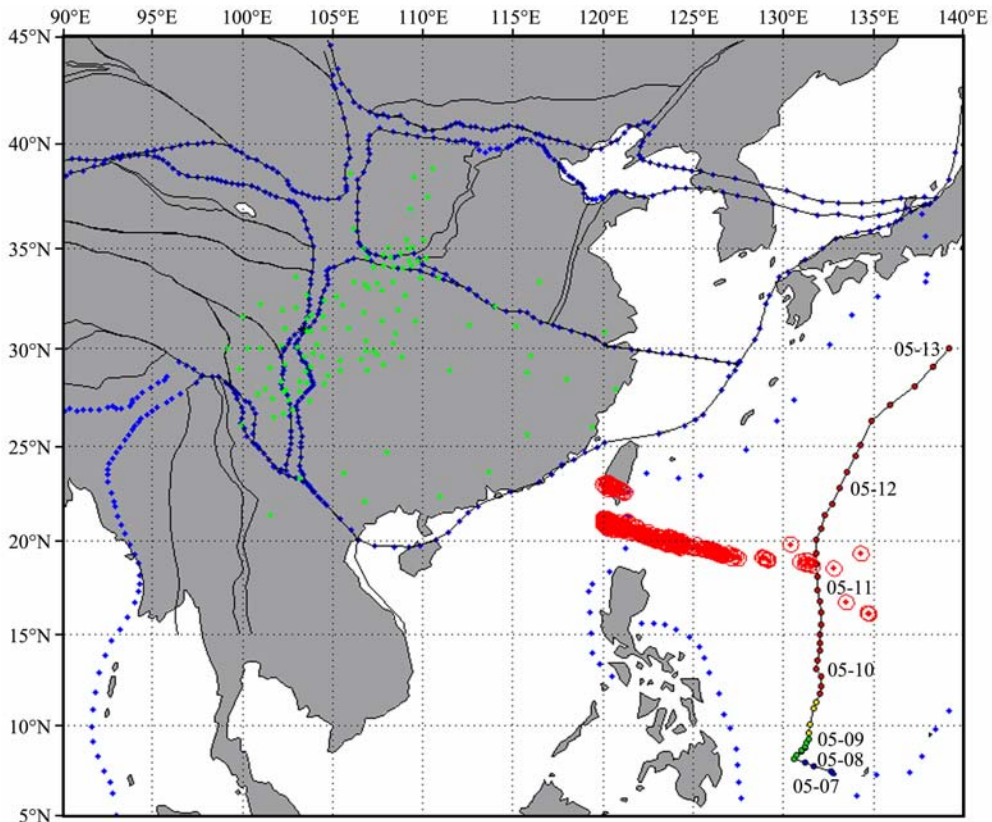


图 9 扰动源扫描算法对 5 月 11 日的“台风扰动”的震动源进行定位的结果

图中绿色点表示用于定位的地震台的位置, 蓝色点线和黑色曲线表示中国大陆的板块边界. 定位所用的观测数据的时间范围为 2008-05-11-13 :00 :00~2008-05-11-13 :30 :00(北京时间). 定位计算前先用数字带通滤波器去掉非台风扰动, 提取出台风扰动. 图中红色圈点表示“台风扰动”最可能的震动源位置. 台风的运动轨迹及其对应的日期都显示图中.

Fig. 9 Location of the seismic sources of typhoon-induced microseism on May 11

The green points indicate the seismic stations used for locating. The blue dot-curves and back lines are plate boundaries. The records used for locating are within 2008/05/11/13:00:00~2008/05/11/13:30:00(Beijing time). The non- typhoon-induced microseism in records is removed by a bandpass filter before using the source scanning algorithm. The most possible source locations are indicated by red circles.

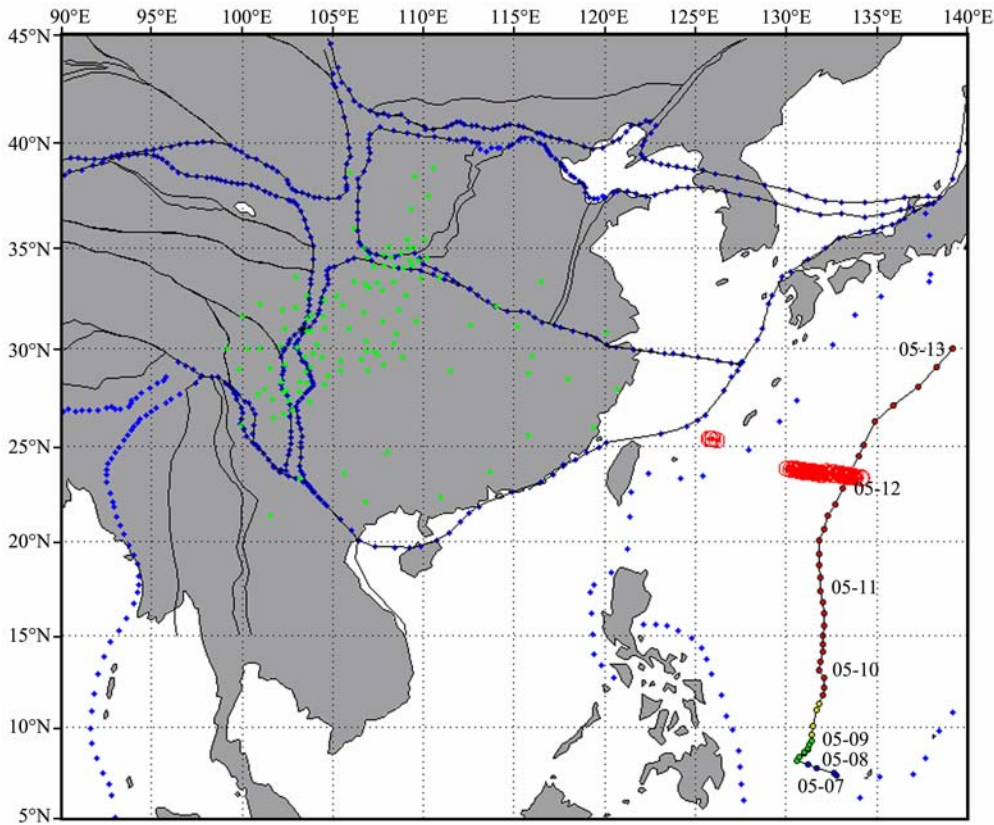


图 10 扰动源扫描算法对 5 月 12 日的“台风扰动”的震动源进行定位的结果
定位所用的观测数据的时间范围为 2008-05-12-13:00:00~2008-05-12-13:30:00(北京时间). 其他同图 11.

Fig. 10 Location of the seismic sources of typhoon-induced microseism on May 12
Similar as in figure 11, but the records used for locating are
within 2008-05-12-13:00:00~2008-05-12-13:30:00 (Beijing time).

的摩擦过程有一定的关系^[19~21]. 发生在板块界面的滑动事件可增加倾斜板块闭锁处的应力, 并有可能在俯冲带上触发地震^[22,23]. 汶川大地震是发生在内陆断裂带上的逆冲型大地震, 具有和海洋俯冲带地震一样的逆冲特点. 汶川大地震前的非台风扰动是否也和地震爆发前的板块运动有关呢?

5 结 论

在本文的研究中, 我们对中国大陆 200 多个宽带地震仪记录中的汶川大地震震前扰动信号的时频特征进行了细致分析. 分析结果表明: 宽带地震仪记录到的汶川大地震震前数十小时的扰动信号由动态特征完全不同的两部分组成. 其中优势频率为 0.2~0.25 Hz 的扰动与台风活动有关, 是海浪驻波激发的海底微地震, 其信号的能量变化与台风 Rammasun 的路径和强度的变化有关. 这种台风扰动是一种震动源在台风附近海底的海源扰动; 另一种优势频率为 0.12~0.18 Hz 的扰动则与台风活动不相关, 是一

种非台风扰动, 其扰动源不在海洋区域, 而在靠近震中的内陆区域. 这种非台风扰动是一种陆源扰动. 汶川大地震震前扰动中的海源扰动部分的内在机理已经清楚, 而其陆源扰动部分的内在机理还需进一步深入研究和定量分析.

致 谢 感谢中国地震局台网中心提供宽带地震仪观测数据, 感谢湖北省地震局胡国庆研究员提供了他研制的宽带倾斜仪在黄梅台的观测数据.

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

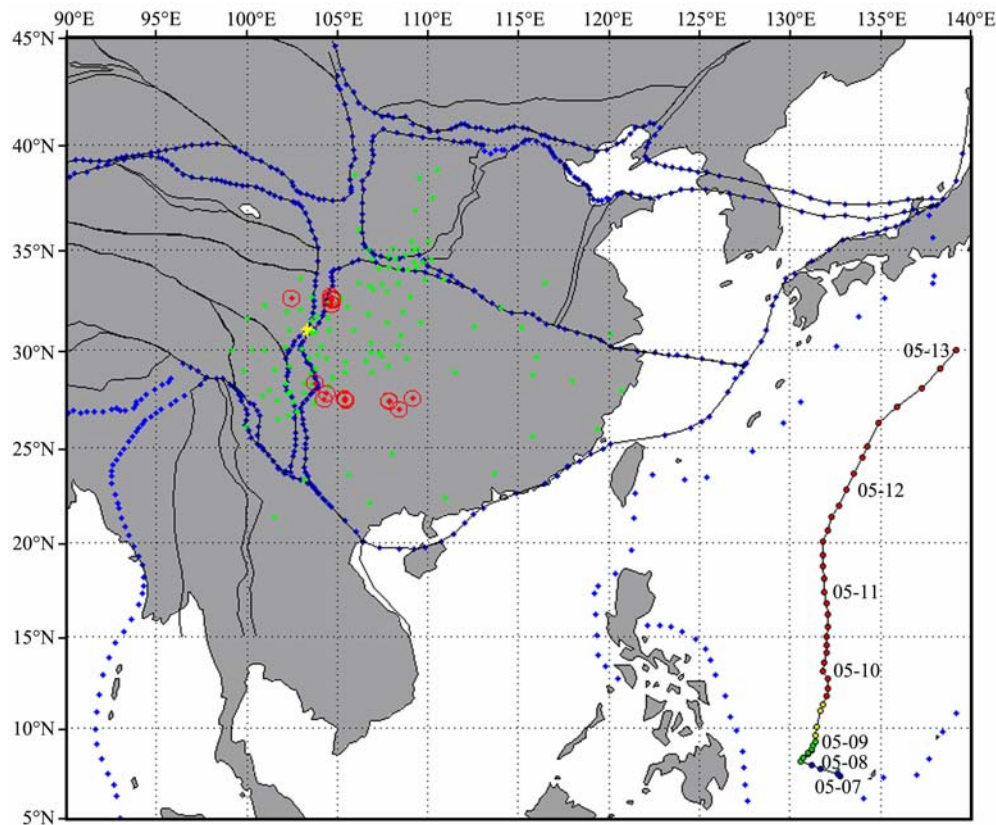


图 11 扰动源扫描算法对 5 月 12 日非台风扰动的震动源进行定位的结果

图中黄色星号表示汶川大地震震中的地理位置,绿色点表示用于定位的地震台的位置,蓝色点线和黑色曲线表示中国大陆的板块边界.定位所用的观测数据的时间范围为 2008-05-12-13 :00 :00~2008-05-12-13 :30 :00(北京时间).定位计算前使用数字带通滤波器去掉台风扰动,提取出非台风扰动.图中红色圈点表示非台风扰动最可能的震动源位置.图中显示了台风的运动轨迹及其对应的日期.

Fig. 11 Location of the seismic sources of non-typhoon-induced microseism on May 12

The yellow star indicates the epicenter of Wenchuan earthquake. The green points indicate the seismic stations used for locating. The blue dot-curves and back lines are plate boundaries. The records used for locating are within 2008-05-12-13 :00 :00 ~ 2008-05-12-13 :30 :00(Beijing time). The typhoon-induced microseism in records is removed by a bandpass filter before using the source scanning algorithm. The most possible source locations are indicated by red circles.

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] Longuet-Higgins M S. A theory of origin of microseisms. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 1950, **243**:1~35

[5] Hasselmann K A. A statistical analysis of the generation of microseisms. *Rev. Geophys.*, 1963,**1**(2):177~209

[6] Haubrich R A Munk W H and Snodgrass F E. Comparative spectra of microseisms and swell. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1963, **53**: 27~37

[7] Tanimoto T. Excitation of normal modes by nonlinear interaction of ocean waves. *Geophys. J. Int.*, 2007, **168**: 571~582

[8] Aster R C, McNamara D E, Bromirski P D. Multidecadal Climate-induced Variability in Microseisms. *Seismol. Res. Lett.*, **79**(2):194~202

[9] 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

Hu X G, Hao X G. An analysis of the influences of typhoon Rammasun and LingLing on anomaly tremors before the great Wenchuan and Kunlunshan earthquakes. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2009, **52**(5):1363~1375

[10] 胡小刚,郝晓光. 2009 年 3 月 19 日 $M_w7.6$ 级汤加大地震的震前扰动现象,地球物理学进展,2009,**24**(3):866~870

Hu X G, Hao X G. Observation of fore-seismic disturbance of the $M_w7.6$ Tonga earthquake (2009/03/19). *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2009, **24**(3):866~870

[11] 郝晓光,胡小刚. 震前扰动现象:从模糊走向清晰——对傅容珊教授商榷文章的回答,地球物理学报,2011,(in press)

Hao X G, Hu X G. Pre-earthquake-tremor maze, from confusing to gradually crystal—answer to the comment by Professor Fu Rong-Shang on The short-term anomalies detected by broadband seismographs before the May 12 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2011, (in press)

[12] Tanimoto T. Excitation of microseisms. *Geophys. Res.*

- Lett. , 2007, **34**, L05308, doi:10.1029/2006GL029046
- [13] Kao H, Shan S J. The source-scanning algorithm: Mapping the distribution of seismic sources in time and space. *Geophys. J. Int.* , 2004, **157**: 589~594
- [14] Kao H, Shan S J, Dragert H, et al. A wide depth distribution of seismic tremors along the northern Cascadia margin. *Nature*. 2005, **436**(7052):841~844
- [15] 李文军, 李 丽, 陈棋福. 用震源扫描算法(SSA)研究列车源的运动. 地球物理学报, 2008, **51**(4):1146~1151
Li W J, Li L, Chen Q F Research on the movement of vibration source of train by means of SSA. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2008, **51**(4):1146~1151
- [16] Correig A M, Urquizú M. Some dynamical characteristics of microseism time series. *Geophys. J. Int.* , 2002, **149**:589~598
- [17] 陈 颢, 黄庭芳. 岩石物理学. 北京: 北京大学出版社, 2001
Chen Y, Huang T F. Rock Physics (in Chinese), Beijing: Peking University Press, 2001
- [18] Chen Y, Li L, Li J, et al. Wenchuan earthquake: Way of thinking is changed. *Episodes*, 2008, **31**(4):374~377
- [19] David R. Shelly, Gregory C. Beroza, Satoshi Ide, et al. Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip. *Nature*, 2006, **442** (7099):188~191
- [20] Ide S, Shelly D R, Beroza G C. Mechanism of deep low frequency earthquakes: Further evidence that deep non-volcanic tremor is generated by shear slip on the plate interface. *Geophys. Res. Lett.* , 2007, **34**, L03308, doi:10.1029/2006GL028890
- [21] David R. Shelly, Gregory C. Beroza, Satoshi Ide, et al. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. *Nature*, 2007, **446**(7133):305~307
- [22] Rogers G, Dragert H. Episodic tremor and slip on the cascadia subduction zone; the chatter of silent slip. *Science*, 2003, **300**: 1942~1943
- [23] Dragert H. Mediating plate convergence. *Science*, 2007, **315**: 471~472

(本文编辑 汪海英)