

严珍珍,张怀,范湘涛等. 汶川与昆仑山强烈地震激发的地球自由振荡频谱的对比分析. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4218-4230, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.033.

Yan Z Z, Zhang H, Fan X T, et al. Comparative analysis on the characteristics of low-frequency energy released by the Wenchuan earthquake and Kunlun Mountain earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4218-4230, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.033.

汶川与昆仑山强烈地震激发的地球 自由振荡频谱的对比分析

严珍珍¹, 张 怀², 范湘涛¹, 杜小平¹, 石耀霖²

¹ 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094

² 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049

摘 要 强烈地震激发的地震波信息非常丰富, 高频信息能量部分会在小范围短时间内迅速衰减, 而低频信息特别是较低频信息能量部分则衰减较慢, 会绕地球很多圈后才会消耗殆尽, 从而激发地球的自由振荡. 虽然地球自由振荡的固有频率不变, 但不同震源机制的地震激发的地球自由振荡频率成分会随着震级、震源机制、方位等的不同而有显著差别. 本文利用 2008 年 5 月 12 日汶川($M_w 7.9$)地震与 2001 年 11 月 14 日昆仑山($M_w 7.8$)地震这两个能量震级相当但震源机制不同的地震, 基于地震波传播理论, 考虑横向各向同性 PREM 地球模型并融合 Crust2.0 地壳模型、S20RTS 地幔模型及 PREM 径向衰减模型, 利用谱元法结合高性能并行计算, 对这两次强烈地震激发的全球地震波传播进行了数值模拟, 计算它们激发的地球自由振荡频谱特征差异. 计算结果显示了汶川地震的逆冲-走滑特性及昆仑山地震的水平左旋走滑特征. 利用理论计算得到的地震波记录进行功率谱密度估计对比分析, 研究结果显示这两次强烈地震释放的低频信息能量大小相当, 但总体上看昆仑山地震释放的能量略小于汶川地震的. 对比分析表明, 不同地震激发的地球自由振荡模式在同一台站处的发育程度不同; 同一地震激发的地球自由振荡在不同台站处记录到的振型频率成分也有很大差异. 对于不同地震激发的地球自由振荡, 有一些频率成分共同出现, 表现为地球自由振荡功率谱能量均较大; 也有一些振型由于相长干涉, 仅在某些地震中被激发而得以良好发育, 表现为功率谱能量明显较大; 而一些振型由于相消干涉, 在一些地震激发方式下被压制, 表现为功率谱能量明显很小, 甚至接近于 0. 计算结果清楚地显示了不同地震激发方式下地球振荡模式丰富而复杂的特性, 需要对不同地震激发的地球振荡信息进行综合深入的分析, 才能对地球内部结构尤其横向不均匀特性给予全面的科学解释.

关键词 汶川地震, 昆仑山地震, 数值模拟, 功率谱密度估计, 地球自由振荡

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.033

中图分类号 P541, P312

收稿日期 2012-06-24, 2012-10-31 收修定稿

Comparative analysis on the characteristics of low-frequency energy released by the Wenchuan earthquake and Kunlun Mountain earthquake

YAN Zhen-Zhen¹, ZHANG Huai², FAN Xiang-Tao¹, DU Xiao-Ping¹, SHI Yao-Lin²

¹ Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

² Key Laboratory of Computational Geodynamics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake of 12 May 2008 and $M_w 7.8$ Kunlun Mountain earthquake of 12 November 2001 have equivalent energy magnitudes. However, the characteristics of

基金项目 国土资源部行业基金地壳深部探测项目(SinoProbe-07), 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2010AA012402), 地震动力学国家重点实验室开放基金, 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB723906)和中国地震局地震行业科研专项经费项目(200808077)资助.

作者简介 严珍珍, 女, 1981 年生, 助理研究员, 主要从事地球动力学数值模拟研究. E-mail: zzyan@ceode.ac.cn

the fault rupture processes and the geographical positions of the two great earthquakes are very different, so the damage and the public attention of the Kunlun Mountain earthquake are far less than Wenchuan earthquake. The seismic wave energy information generated by strong earthquakes is very rich. High-frequency energy will be quickly decayed within short time in the small scope, but low-frequency energy especially very low-frequency energy will be decayed slowly, and can be spread many laps around the Earth before consumed. We employ the spectral element method incorporated with large-scale parallel computing technology to investigate the characteristics of seismic wave propagation excited by the two great earthquakes. The transverse isotropic PREM model is employed as a prototype of the numerical global Earth model. The Crust2.0 and S20RTS models are taken into consideration. These wave propagation processes are simulated by solving three-dimensional elastic wave governing equations. The visualization of the numerical results displays the profile with three components of the seismic wave propagation. Our calculation displays the thrusting and strike-slip of the source rupture process of the Wenchuan earthquake and the left-lateral strike-slip of the source rupture process of the Kunlun Mountain earthquake, respectively. By taking comparison of low-frequency energy information of synthetic seismograms excited by the two earthquakes, the results show that the energy at low-frequency oscillation modes is relatively equivalent, but the energy of the Kunlun Mountain earthquake is slightly smaller than the energy of the Wenchuan earthquake. The results also demonstrate that the frequency components are almost the same at low-frequency displacement amplitude spectra recorded by different stations between the two great earthquakes, but the energy is obviously different. This can further reveal that the characteristics of Earth's oscillation triggered by large earthquakes with different source ruptures are different, and the characteristics of Earth's oscillations recorded by different stations are also different.

Keywords Wenchuan earthquake, Kunlun Mountain earthquake, Numerical simulation, Power spectral analysis, Earth's oscillations

1 引言

2008年5月12日,四川汶川(31.49°N, 104.11°E)发生 M_w 7.9级大地震.汶川主震由一个地下初始破裂点沿着北东走滑、西部倾斜的龙门山逆冲断层带向前扩展,破裂长度达300 km^[1].而2001年11月14日,昆仑山口西(36.2°N, 90.9°E)发生 M_w 7.8级地震,破裂长度达350~500 km,震级与汶川地震相仿^[2].

另外,汶川地震发生在龙门山断裂带上,是映秀—北川中央主断裂带突发逆冲和走滑错动的结果,属于逆冲-走滑型地震,以逆冲为主.西南部主要以逆冲为主,东北部主要以右旋走滑为主,使得长期积聚的能量突然释放,影响范围极大,破坏力极强^[3-5].而昆仑山地震发生在东昆仑断裂的西段,破裂带恰好位于NWW走向的昆仑山口左旋走滑断裂带上,属于走滑型地震,造成断裂带两侧的地块水平

错开,破裂表现为自西向东单向扩展的特点,地震破裂带相对较窄,能量释放快,破坏范围相对较小^[2,6-11].

汶川地震发震构造属龙门山断裂带,与青藏块体东北缘相邻.张希等基于形变观测资料,借助非震负位错反演,结合地震活动,综合对比研究了汶川与昆仑山强烈地震对该区地壳运动及主要断裂带应变积累的影响^[12].梅世蓉等综合分析研究了汶川与昆仑山强烈地震前在不同时段、不同范围出现了多项相似的地震活动性异常^[13].陈祖安等用三维流变非连续变形与有限元相结合的方法,研究昆仑山大地震引起各构造块体边界断层应力状态变化特征,特别是对2008年汶川大震发震断层的影响,认为这一破裂过程对汶川大震发震断层发生逆冲型失稳起了促进作用^[14].

随着地震学理论的逐步完善以及高性能并行计算技术的迅速发展,为研究越来越复杂的地球物理问题提供了一个新的研究途径.近几年来,采用超大规模并行计算的数值模拟方法研究地震激发地震波

传播问题是国际地震学研究领域的一个重要发展方向。谱元法能够很好地用于研究地震及其引起的强地面运动的复杂特性,已成为地震波传播动力学过程数值模拟研究的重要工具,并得到了广泛的应用,获得了满意的结果^[15-20]。

强烈地震激发的地震波信息丰富,高频信息会在小范围内快速衰减,但是低频信息,特别是较低频信息的衰减很慢,会绕着地球很多圈后才会消耗殆尽,同时激发地球的自由振荡。目前,很多学者对这两次特大地震激发的地球自由振荡分别进行了相关的研究^[21-23]。在本文中,我们基于地震波传播理论,考虑横向各向同性 PREM 地球模型并融合 Crust2.0 地壳模型^[24]、S20RTS 地幔模型^[25]及 PREM 径向衰减模型^[21-24],利用谱元法结合高性能并行计算,对汶川与昆仑山强烈地震激发的全球地震波传播特征进行数值模拟,对比分析这两次地震激发的地球自由振荡模式的基本特征,特别是它们激发的较低频基频振荡模式特征差异,以期有助于进一步认识两次强烈地震的震源机制特性和地球内部结构^[26]。

2 数值模型

本研究中,使用的程序是 Jeroen Tromp 等人提供的 SPECFEM3D_GLOBE 谱元法程序^[27-28]。数值模型采用六面体网格,单元数约为 395.82 万个,网格节点数约为 2.551 亿个,时间步长为 0.1615 s,地球表面节点间平均距离约为 0.141°,需要计算机进

程为 216 个,根据现有的并行计算条件确定模拟地震波传播时间为 1500 min,计算时间约为 72 h,数值模拟精度能够达到最短周期约为 18.13 s,即 0.056 Hz。数值模型、汶川及昆仑山地震震中位置如图 1 所示。

数值模拟中,为了求得地震位错引起的位移场,我们将地震位错表示为一个集中力,为双力偶源,以使较好地反映两次地震激发的地球自由振荡模式及释放的低频信息能量特征。

若将物理应力与由胡克定律得到的模型应力之间的差异定义为应力过剩 $d\mathbf{T}$,则震源集中力表示为 $\mathbf{f} = -\nabla \cdot (d\mathbf{T})$ 。近似点源情况下,应力过剩率

$$\partial_t(d\mathbf{T}) = \mathbf{M}\delta(\mathbf{X} - \mathbf{X}_s)\delta(t - t_s), \quad (1)$$

进一步有^[29-31]

$$\begin{aligned} d\mathbf{T} &= \int_{-\infty}^t \mathbf{M}\delta(\mathbf{X} - \mathbf{X}_s)\delta(\tau - t_s)d\tau \\ &= \mathbf{M}\delta(\mathbf{X} - \mathbf{X}_s)\int_{-\infty}^t \delta(\tau - t_s)d\tau, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mathbf{f} = -\mathbf{M} \cdot \nabla \delta(\mathbf{X} - \mathbf{X}_s)H(t - t_s), \quad (3)$$

其中, $H(t)$ 为单位阶跃函数。震源力一般可以表示为

$$\mathbf{f} = -\mathbf{M} \cdot \nabla \delta(\mathbf{X} - \mathbf{X}_s)S(t), \quad (4)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{rr} & M_{r\theta} & M_{r\phi} \\ M_{\theta r} & M_{\theta\theta} & M_{\theta\phi} \\ M_{\phi r} & M_{\phi\theta} & M_{\phi\phi} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, \mathbf{M} 为矩张量; $S(t)$ 为震源时间函数,本文中以阶跃脉冲表示震源时间函数; $\delta(\mathbf{X} - \mathbf{X}_s)$ 为狄拉克函数(dirac delta)分布; \mathbf{X}_s 为震源震中位置。

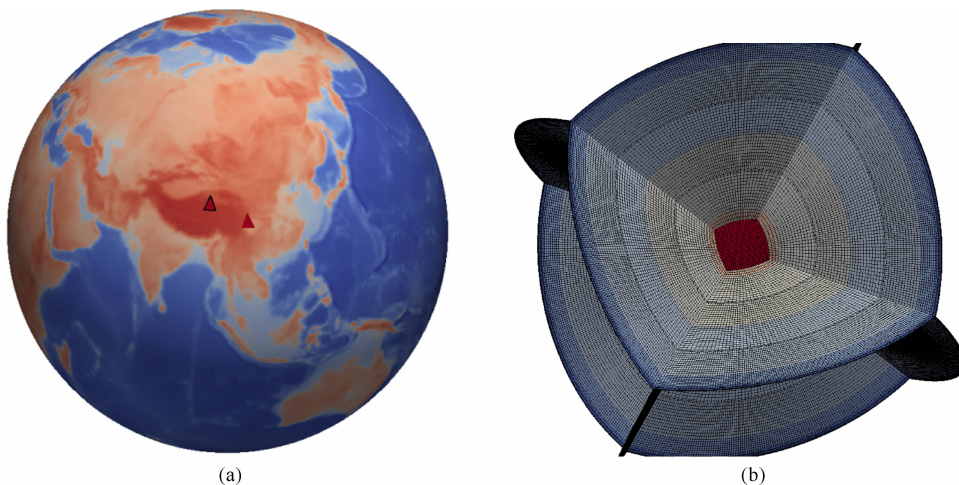


图 1 数值模型

(a) 为地表地形及震中位置(▲为汶川地震震中;△为昆仑山地震震中)。(b) 为模型内部网格单元,从地心到地表逐层划分网格,并在 ICB、670 km 及 Moho 面处进行了网格加密处理。

Fig. 1 Numerical model

(a) Surface topography and epicenters; (b) Inner mesh of the model, the density of the mesh is doubled at the ICB, 670 km, and Moho interface, respectively.

考虑重力势,则重力势^[29, 32]表示为 $\Psi + \psi$, 前者为平衡重力势,后者为扰动重力势. 密度表示为 $\rho + \delta\rho$. ψ 与 $\delta\rho$ 相对很小.

扰动重力势 ψ 在地球内部满足泊松方程 $\nabla^2 \psi = 4\pi G(\delta\rho)$, 在地球外部满足拉普拉斯方程 $\nabla^2 \psi = 0$; 连续方程为: $\delta\rho = -\nabla \cdot (\rho s)$. G 为重力常数,取值为 6.67×10^{-11} ; s 为位移.

重力的影响表现在体力项中,有

$$f_1 = \rho \nabla \psi. \quad (6)$$

考虑重力势位扰动,则弹性体的运动方程式可以描述为

$$\rho \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = \nabla \cdot \tau + \nabla (\rho s \cdot g) - \rho \nabla \psi - \nabla \cdot (\rho s) g. \quad (7)$$

考虑震源项,则

$$\rho \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = \nabla \cdot \tau + \nabla (\rho s \cdot g) - \rho \nabla \psi - \nabla \cdot (\rho s) g + f, \quad (8)$$

其中, τ 为应力张量,与位移梯度 ∇s 呈线性关系; g 为重力势梯度(重力加速度), $g(r) = \frac{d\Psi}{dr} \cdot \nabla (\rho g \cdot s) - \nabla \cdot (\rho s) g$ 为平衡重力势项,即 Ψ , 与物质本身有关, $\nabla \psi$ 为扰动重力势作用项. 地球的运动导致重力势的扰动,最后反过来会影响地球的运动,地球重力的影响就体现在这一项中,表现为弹性动力学方程的体力项,它与物质本身及坐标系、频率等有关,由于 ψ 既要满足泊松方程同时也要满足拉普拉斯方程,导致在数值模拟求解变得非常困难^[30],因此,忽略扰动重力势,保留非扰动重力势,即忽略质量重新分布,式(8)化简得

$$\rho \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = \nabla \cdot \tau + \nabla (\rho s \cdot g) - \nabla \cdot (\rho s) g + f. \quad (9)$$

震源参数都来自于最新的 Centroid Moment Tensor(CMT)震源机制解,汶川地震的标量地震矩大小为 $8.97 \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$; 昆仑山地震的标量地震矩大小为 $5.9 \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$.

汶川地震矩张量参数(单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$)为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 5.69 \times 10^{20} & -1.99 \times 10^{20} & 5.61 \times 10^{20} \\ -1.99 \times 10^{20} & 1.04 \times 10^{19} & -3.48 \times 10^{20} \\ 5.61 \times 10^{20} & -3.48 \times 10^{20} & -5.79 \times 10^{20} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

昆仑山地震矩张量参数(单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$)为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -5.84 \times 10^{19} & -8.24 \times 10^{19} & 3.09 \times 10^{20} \\ -8.24 \times 10^{19} & 1.65 \times 10^{20} & 4.78 \times 10^{20} \\ 3.09 \times 10^{20} & 4.78 \times 10^{20} & -1.07 \times 10^{20} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

3 模拟结果与分析

考虑地表地形、地球内部介质衰减及地球重力因素等情况下,分别对 2008 年汶川地震及 2001 年昆仑山地震激发的全球地震波传播过程进行了数值计算. 通过给定的人工地震台站,数值模拟结果记录了地震波传播走时图,包括南北向(N—S 向)、东西向(E—W 向)及垂向(Z 向)三个分量. 其中,水平向以东、北向为正,垂向以向上为正. 2008 年 5 月 12 日汶川地震与 2001 年 11 月 14 日昆仑山地震在不同时刻的地震波传播形态经归一化处理后的结果分别如图 2 和图 3 所示,考虑到两次地震的震源特性很不一样,分别显示了东西向、南北向及垂向的三分量在不同时刻的波形图,红色为正值,蓝色为负值.

图 2 中,当波传播到 80.75 s 时,从水平分量可以清晰看出,发震断层走向为 NE 向;东西向位移分量中,西部位移量大于东部位移量;南北向位移分量中,北部位移量大于南部位移量;垂向位移分量中,西北部位移量较东南部位移量大. 这主要与西盘为逆冲断层的上盘,受上盘效应影响有关. 数值模拟结果显示了汶川地震断层的逆冲-走滑特性.

图 3 中,当波传播到 80.75 s 时,从水平分量可以清晰看出,发震断层走向为 NWW 向. 由于地震破裂过程及地质构造等因素影响,地震波位移以断层走向为界限表现明显不对称性. 东西向位移分量中,南部位移量最大;南北向位移分量中,东部位移量最大,表明此次地震的主动盘为南盘,伴随明显的水平左旋走滑特征. 地震引起的地表破裂方向自西北向东南,使得青海、四川及甘肃等地区震感较明显.

在全球范围内放置了不同方位、不同震中距的台站,用以计算这两次地震激发的理论地震图. 综合考虑两次地震不同的震源机制特性,选取其中 5 个台站的数据用以做对比分析研究,分别为 GAR (28.49°, 18.23°)、PALK (32.49°, 30.52°)、CHTO (13.41°, 17.74°)、INCN (19.51°, 27.03°) 及 WUHAN (8.97°, 18.81°) 台站,括号内数字分别为台站相对于汶川地震、昆仑山地震的震中距值,这些台站相对于两个震中的位置分布情况如图 4 所示. 从图 4 中可以看到,我们从分布于全球 100 多个记录台站中选取了 5 个震中距在 30°左右及以内范围的台站,部分台站距离汶川地震较近,部分台站距离昆仑山地震较近,还有一些台站距离这两次地震震中的距离

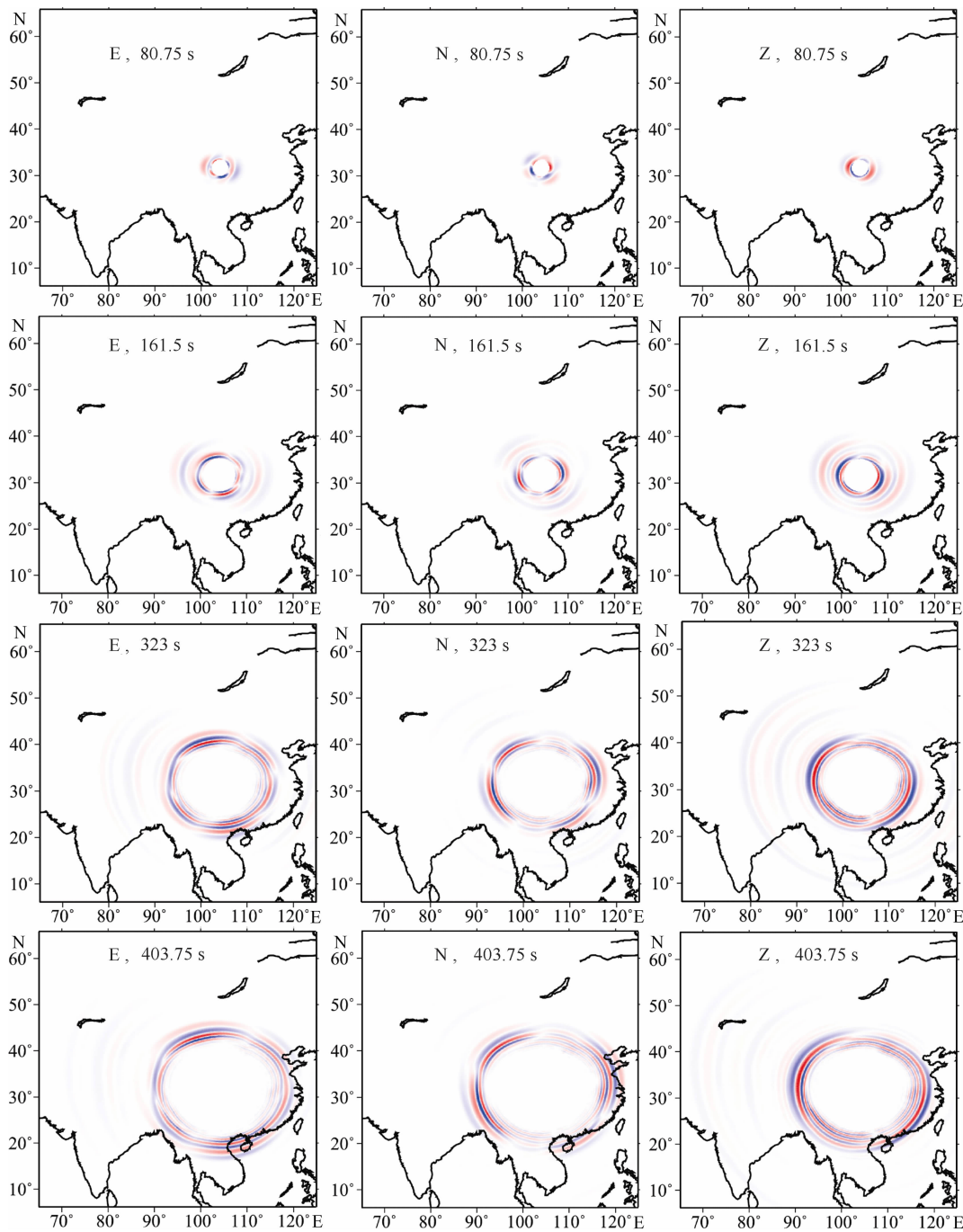


图 2 2008 年 5 月 12 日汶川地震地震波在地球表面的传播形态

Fig. 2 Snapshots of the three components of the wave field of the Wenchuan earthquake at different times

相当。

对 5 个台站计算的关于汶川地震和昆仑山地震的 1500 min 的理论地震图进行功率谱密度估计分析,得到两次地震激发的地球自由振荡频谱特征在低频段 (0.3~3 mHz 频段) 的对比结果分别如图 5—9 所示。由于两次地震的震源机制特征不同,每幅图中均显示了东西向 (E 向)、南北向 (N 向) 及垂向 (Z 向) 三个分量的分析结果,以更好地对两次地震激发的地球自由振荡模式特征和释放的低频信息

能量特性进行对比分析。

GAR 台站位于这两次地震的西偏北向,尽管该台站距离昆仑山地震震中较近,但是对该台站处记录到的位移分量进行功率谱密度估计分析,可以看出,昆仑山地震在该台站处的东西向和垂向谱能量值明显较汶川地震的小,而南北向的谱能量值却很大,如图 5 所示。

PALK 台站位于这两次地震的西南方向,距离昆仑山地震震中略微近一些,从谱能量对比分析结

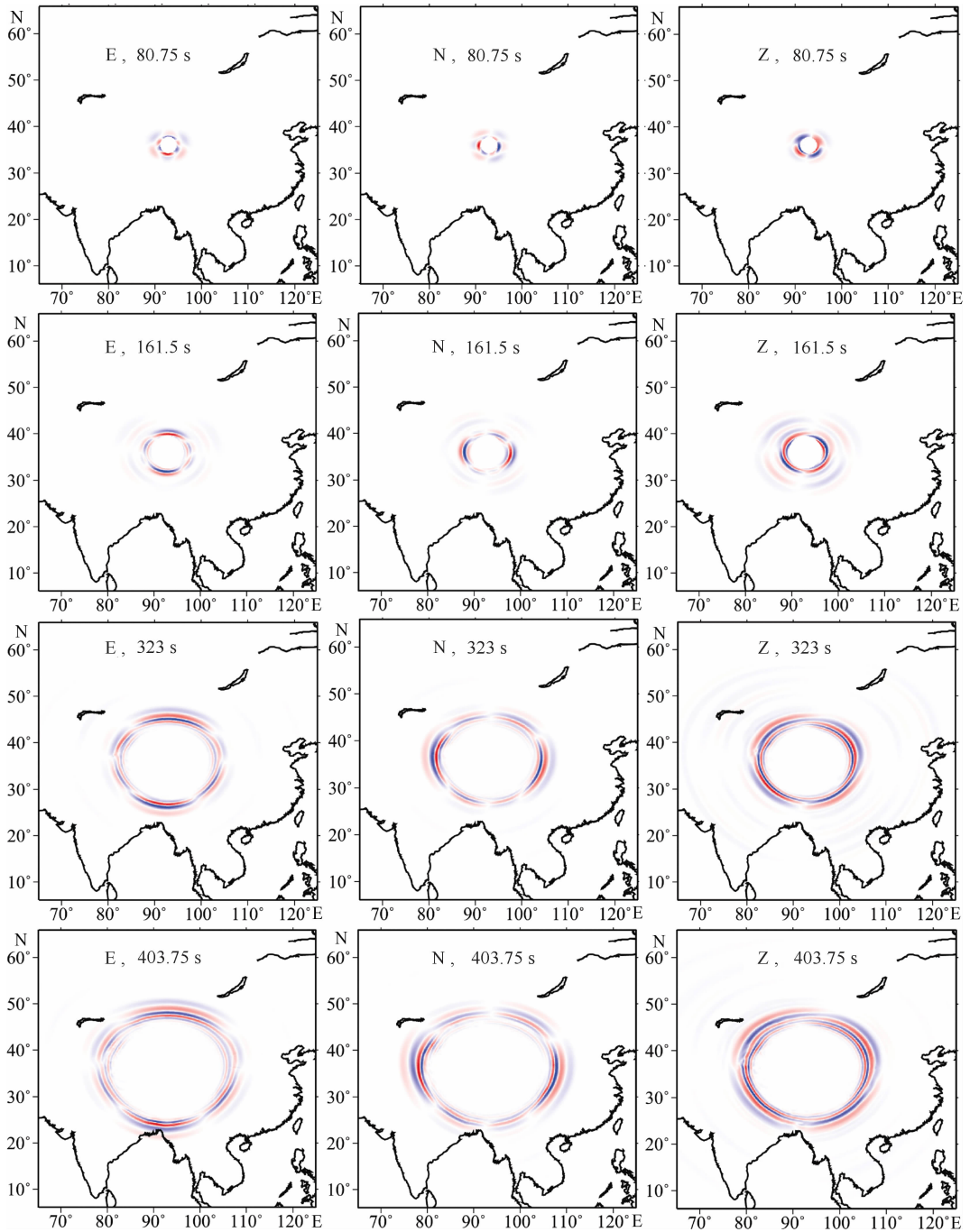


图3 2001年11月14日昆仑山地震地震波在地球表面的传播形态

Fig. 3 Snapshots of the three components of the wave field of the Kunlun Mountain earthquake at different times

果可以明显看出,昆仑山地震在该台站处的东西向和垂向的谱能量值均较汶川地震的大,反而南北向的谱能量值较汶川地震的略小,仅在少许频率上的能量值表现为汶川地震的较大,如图6所示。

CHTO台站位于汶川地震的南偏西方向、昆仑山地震的南偏东向,距离汶川地震震中略近,但是该台站处的三分量谱能量值表现为昆仑山地震的较汶川地震的大,垂向分量的较低频能量表现为汶川地震的较大,如图7所示。

INCN台站位于这两次地震的东偏北向,距离汶川地震震中较近,该台站处的三分量谱能量值大小相当,但是昆仑山地震的E向分量的较低频谱能量值很大,这可能与昆仑山地震的左旋走滑特征有关,如图8所示。

WUHAN台站位于汶川地震的东向、昆仑山地震的东偏南向,距离汶川地震震中很近,所以该台站处记录的汶川地震的三分量谱能量值均较大,主要表现在E向及垂向分量的谱能量分析结果中,而昆

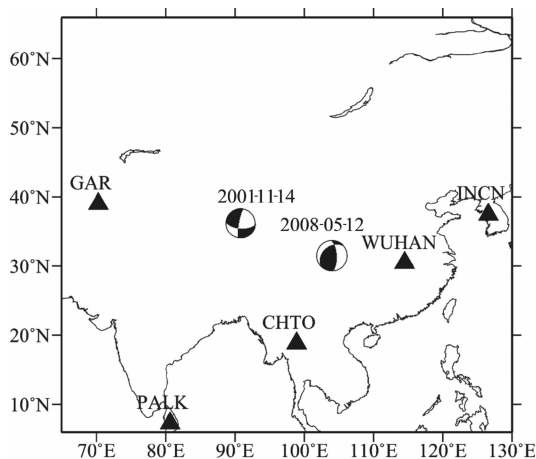


图 4 5 个台站相对于汶川和昆仑山地震震中的位置分布图

Fig. 4 Locations of five stations around the Wenchuan earthquake and Kunlun Mountain earthquake

仑山地震的 N 向分量的谱能量值依然表现较大与汶川地震的相当,如图 9 所示.

综上所述,数值结果很好地反映了两次强烈地震的震源特性,与现有文献和理论研究结果具有很好的一致性,显示了本文数值计算结果是合理的.关于汶川地震,GAR 台站处记录的垂向谱能量值较其它 4 个台站处记录的值大,表明汶川地震的西盘是逆冲断层的上盘,受上盘效应影响.5 个台站处记录的水平向谱能量值均较大,尤其表现在 WUHAN、INCN 及 CHTO 台站处,体现了汶川地震的右旋特性.关于昆仑山地震,CHTO 台站处记录的垂向谱能量值较其它 4 个台站处记录的值大,这可能与昆仑山地震的主动盘是南盘有关.PALK 台站处记录的东西向谱能量值较其它 4 个台站处记录的值大,反而南北向的谱能量值较其它 4 个台站处记录的值小,表明了昆仑山地震的发震断层走向为 NWW 向,并伴有明显的左旋走滑特征.5 个台站处记录的垂向谱能量值均明显小于水平向的谱能量值,表明了发震断层的水平走滑占优的特性.总体来讲,数值模拟结果清晰地显示这两次强烈地震激发的较低频自由振荡模式的能量大小相当,昆仑山地震的略小于汶川地震的.

从图 5—9 的对比结果中还可以看到,两次大地震激发的地球自由振荡在同一台站处记录到的振荡频率成分不同,即在能量大小上表现有明显的区别,分别表现在水平向位移分量的能量谱和垂向位移分量的能量谱结果上.对比分析表明,不同地震激发的地球自由振荡模式在同一台站处的发育程度不同;同一地震激发的地球自由振荡在不同台站处记录到

的振型频率成分也有很大差异.对于不同地震激发的地球自由振荡,有一些频率成分共同出现,表现为地球自由振荡功率谱能量均较大;也有一些振型由于相长干涉,仅在某些地震中被激发而得以良好发育,表现为功率谱能量明显较大;而一些振型由于相消干涉,在一些地震激发方式下被压制,表现为功率谱能量明显很小,甚至接近于 0.总之,功率谱分析清楚地显示了不同地震激发方式下地球振荡模式丰富而复杂的特性,需要对不同地震激发的地球振荡信息进行综合深入的分析,才能对地球内部结构尤其横向不均匀特性给予全面的科学解释.

将数值计算得到的两次地震激发的地球自由振荡较低频的基频振荡频率与地球初步参考模型(PREM)的理论振荡频率进行对比,发现 5 个台站处记录到的低频振型振荡频率与 PREM 模型预测的振荡频率在一定程度上吻合很好,由于台站的位置不同,使得计算得到的结果与 PREM 模型理论值之间存在不同程度的略微差异.

环型振型没有径向位移,只有横向位移,不会引起密度变化,所以重力不会影响环型振型的频率.对于球型振荡,密度变化影响球型振荡整个运动,由于重力是一有效的体力,它随时间的变化将影响到整个地球的运动形态,并且对长周期振型的影响要远远大于对短周期振型的影响^[32-35],因此,对比球型振型的计算结果(图 5—9)可知,由于地球重力在数值模型中的处理误差(式(9)),使得 5 个台站处记录到的 0S2—0S5 等几个甚低频的球型振型频率均表现较大的误差,并且误差随着振型频率的增大而相对减小^[30].地球重力对地球球型振型模式的影响非常复杂,重力效应对计算结果的影响还需要更深层的认识和进一步的研究.

4 结论与讨论

汶川地震是逆冲-走滑型断层地震,由于断层错动时间长,破坏性极强,诱发了大量的滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,为世界地震灾害史罕见.而昆仑山地震由于发生在青藏高原北部,人烟稀少,所以造成的破坏以及公众影响程度远远小于汶川地震.

强烈地震激发的地震波信息极其丰富,高频信息能量会在小范围内快速衰减,而低频信息,特别是较低频信息的能量则衰减很慢,会绕着地球很多圈后才会消耗殆尽,激发地球的自由振荡.不同台站记录到的不同频率振型的幅度与激发自由振荡的大震

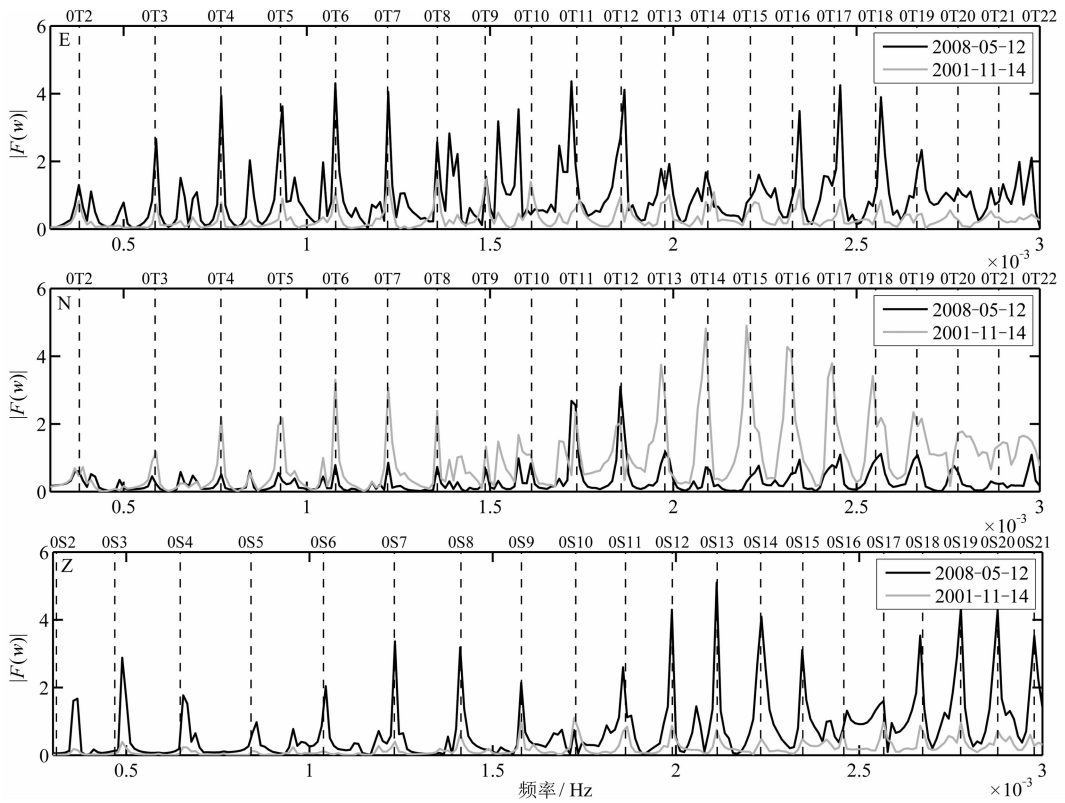


图 5 GAR 台站记录到的关于汶川地震、昆仑山地震位移三分量(E 向、N 向和 Z 向)的功率谱密度估计值在 0.3~3 mHz 频段范围的对比结果
 Fig. 5 Amplitude spectra of three components (E, N, Z) of the Wenchuan earthquake and Kunlun Mountain earthquake recorded at GAR station

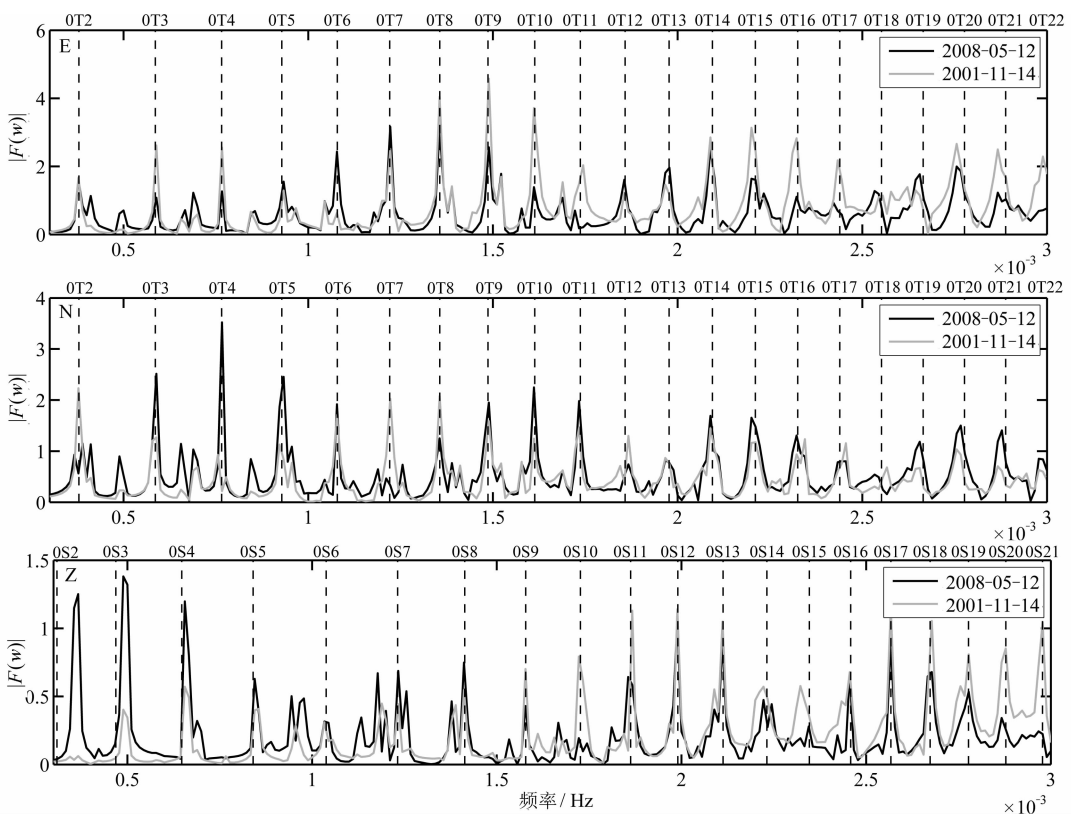


图 6 PALK 台站记录到的关于汶川地震、昆仑山地震位移三分量(E 向、N 向和 Z 向)的功率谱密度估计值在 0.3~3 mHz 频段范围的对比结果
 Fig. 6 Amplitude spectra of three components (E, N, Z) of the Wenchuan earthquake and Kunlun Mountain earthquake recorded at PALK station

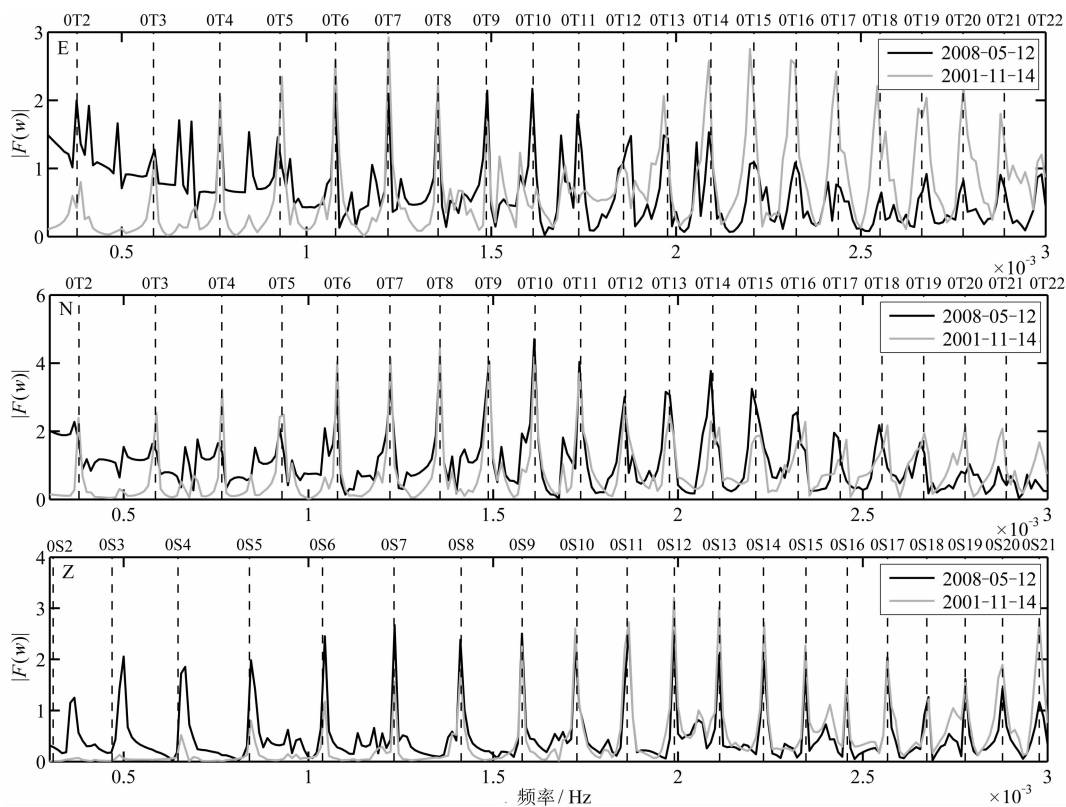


图 7 CHTO 台站记录到的关于汶川地震、昆仑山地震位移三分量(E 向、N 向和 Z 向)的功率谱密度估计值在 0.3~3 mHz 频段范围的对比结果

Fig. 7 Amplitude spectra of three components (E, N, Z) of the Wenchuan earthquake and Kunlun Mountain earthquake recorded at CHTO station

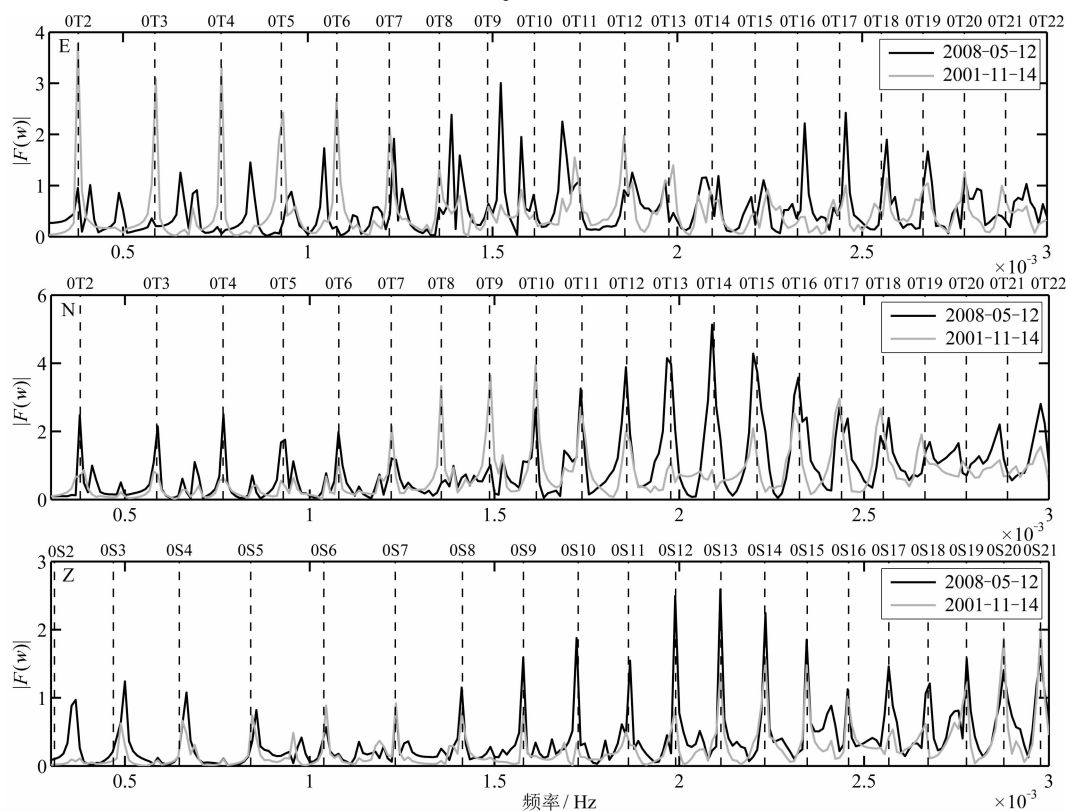


图 8 INCN 台站记录到的关于汶川地震、昆仑山地震位移三分量(E 向、N 向和 Z 向)的功率谱密度估计值在 0.3~3 mHz 频段范围的对比结果

Fig. 8 Amplitude spectra of three components (E, N, Z) of the Wenchuan earthquake and Kunlun Mountain earthquake recorded at INCN station

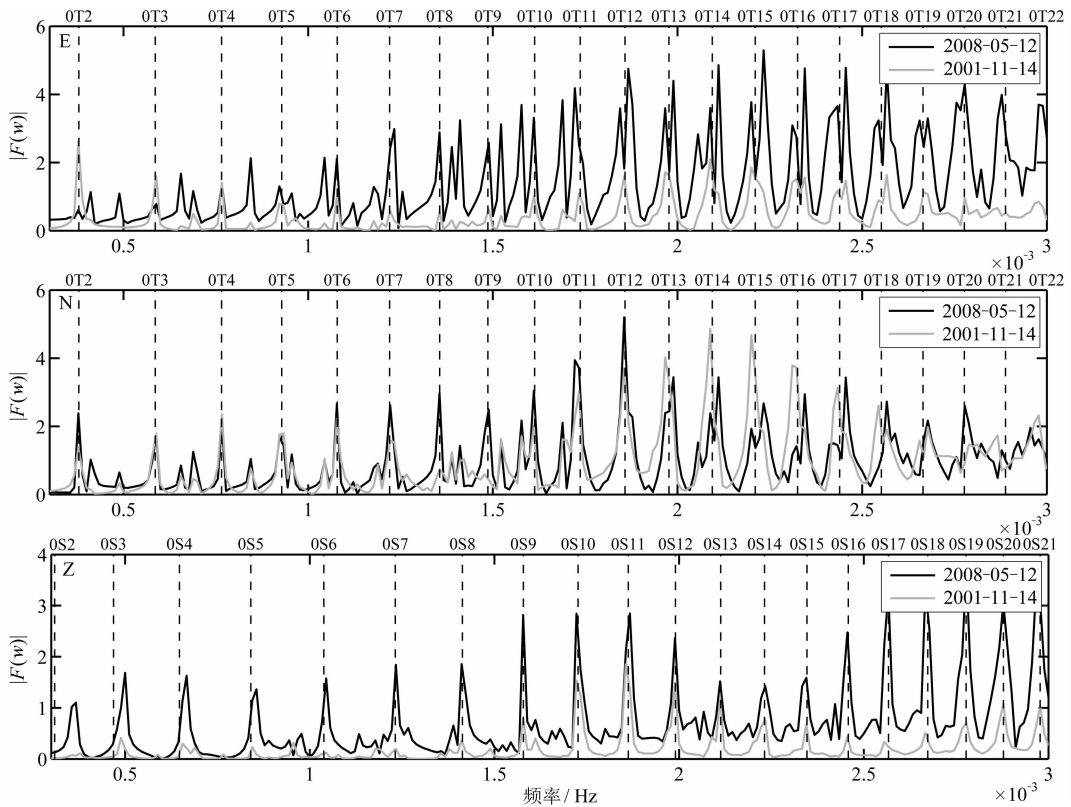


图9 WUHAN 台站记录到的关于汶川地震、昆仑山地震位移三分量(E 向、N 向和 Z 向)的功率谱密度估计值在 0.3~3 mHz 频段范围的对比结果

Fig. 9 Amplitude spectra of three components (E, N, Z) of the Wenchuan earthquake and Kunlun Mountain earthquake recorded at WUHAN station

震中位置和震源机制有复杂的关系,也与地球结构有关.高性能数值计算,提供了研究不同机制震源在横向不均匀地球模型中在不同台站造成的不同频率振型的特征的可能性.在本文中,我们基于地震波传播理论,考虑横向各向同性 PREM 地球模型并融合 Crust2.0 地壳模型、S20RTS 地幔模型及 PREM 径向衰减模型,利用谱元法结合高性能并行计算,对汶川与昆仑山强烈地震激发的全球地震波传播进行了数值模拟研究,将两次强烈地震激发的地球自由振荡模式进行了对比分析.初步的计算结果显示了汶川地震的逆冲-走滑特性及昆仑山地震的水平左旋走滑特征.

对两次地震释放的低频信息能量进行了对比分析研究(图 5—9),结果显示,这两次强烈地震激发的低频基频振型模式的能量大小相当,但总体上看昆仑山地震的略小于汶川地震的.另外,两次大地震在同一台站处激发的地球自由振荡模式发育程度不同,在能量大小上表现有明显的差别,分别体现在水平向位移分量的能量谱和垂向位移分量的能量谱上,一些振型在某些台站处记录的能量很小,而在另

一些台站处记录的能量很大,发育很好.计算结果表明不同地震激发的地球自由振荡模式特征不同,不同台站处记录到的同一地震激发的振荡模式也不相同.

本文中,我们仅选取了 5 个台站处记录的数据进行了处理分析,不同台站记录的有效信息存在差异.并且,模型中设定的震源参数十分有限,地球重力的处理误差、数值模拟精度以及计算时间长度等因素都不可避免地影响数值模拟结果,使得计算存在误差.当然数值模拟模型是基于三维地球模型,地球的三维效应对数值模拟结果也存在影响^[36].这些暂且不作为本文讨论的重点,将在以后的进一步深层研究中考虑.

随着重力仪观测精度的提高,特别是超导重力仪在中国的出现,地球球型振荡振型的研究有了很大进展,通过对此仪器记录到的自由振荡信号谱进行对比分析和研究,能很清楚地检测到地球球型振荡谱的分裂、耦合等现象,这些现象与地球内部的横向不均匀性存在紧密性^[37-39].然而,地球结构的不均匀性是地球自由振荡振型的一个非常重要的影响因

素, 仅从现有的观测数据中难以获取较独立的分析结果. 考虑到理论周期的推导和计算的繁琐性, 实际上往往主要考虑的是随地球半径变化径向不均匀性, 如采用 AK135、PREM (Preliminary Reference Earth Model) 理论模型等, 而横向不均匀性对地球自由振荡的影响却涉及不多. 同时, 由于目前可以获得的这个方面的约束条件有限, 对它的研究仍然是一个比较难于解决的问题. 将理论数据与实际观察结果比较验证, 不仅有益于确定特大地震的震级, 也为研究地球的内部结构提供了一次难得的机遇, 进而可以对地球内部结构横向不均匀性研究等提出进一步认识及更新的观点. 随着并行计算机的发展, 数值模拟方法的计算精度也会有更进一步的提高, 我们将在今后的继续研究中, 继续改进和完善震源参数的输入条件及数值模型, 以更好地用于特大地震激发的地球自由振荡及地球内部结构横向不均匀性等相关研究中.

参考文献 (References)

- [1] 张勇, 冯万鹏, 许力生等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(10): 1186-1194.
Zhang Y, Feng W P, Xu L S, et al. Spatio-temporal rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(2): 145-154.
- [2] 张永双. 对比 8.1 级昆仑山地震. 人与生物圈, 2009, 2(S1): 42-43.
Zhang Y S. The Kunlun Mountain M_s 8.1 earthquake. *Man and Biosphere* (in Chinese), 2009, 2(S1): 42-43.
- [3] 王卫民, 赵连锋, 李娟等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1403-1410.
Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(5): 1403-1410.
- [4] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽等. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1066-1073.
Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(4): 1066-1073.
- [5] 滕吉文, 白登海, 杨辉等. 2008 汶川 M_s 8.0 地震发生的深层过程和动力学响应. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1385-1402.
Teng J W, Bai D H, Yang H, et al. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan M_s 8.0 earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(4): 1385-1402.
- [6] 沈军, 尹光华, 赵瑞斌. 2001 年 11 月 14 日新疆青海交界东昆仑山 8.1 级地震构造背景初探. 内陆地震, 2002, 16(1): 1-7.
Shen J, Yin G H, Zhao R B. Preliminary study on seismogenic tectonic background of Kunlun M_s 8.1 earthquake on Nov. 14, 2001 on the juncture of Xinjiang and Qinghai, China. *Inland Earthquake* (in Chinese), 2002, 16(1): 1-7.
- [7] 马超, 单新建. 昆仑山 M_s 8.1 地震震源参数的多破裂段模拟研究. 地球物理学报, 2006, 49(2): 428-437.
Ma C, Shan X J. A multi-segment analytic modeling of hypocentral geometric characteristic parameters of the M_s 8.1 earthquake at the Kunlun Mountains. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(2): 428-437.
- [8] 邵志刚, 傅容珊, 薛霆毓等. 昆仑山 M_s 8.1 级地震震后变形场数值模拟与成因机理探讨. 地球物理学报, 2008, 51(3): 805-816.
Shao Z G, Fu R S, Xue T X, et al. The numerical simulation and discussion on mechanism of postseismic deformation after Kunlun M_s 8.1 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3): 805-816.
- [9] 马超, 单新建. 基于实测值分段线性内插模型的 InSAR 视线向同震位错分解——以青藏高原昆仑山 M_s 8.1 地震为例. 地震学报, 2006, 28(1): 98-104.
Ma C, Shan X J. Decomposing InSAR LOS displacement into coseismic dislocation by linear interpolation modeling—a case study of the Kunlun Mountain M_s 8.1 earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2006, 28(1): 98-104.
- [10] 吴中海, 胡道功, 吴珍汉. 青藏铁路邻侧昆仑山 2001 年 M_s 8.1 级地震地表破裂特征分析. 地球学报, 2004, 25(4): 411.
Wu Z H, Hu D G, Wu Z H. Characteristics of co-seismic surface rupture of the 2001 M_s 8.1 central Kunlun earthquake in the area adjacent to the Qingzang railway. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2004, 25(4): 411.
- [11] 许力生, 陈运泰. 从全球长周期波形资料反演 2001 年 11 月 14 日昆仑山口地震时空破裂过程. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(3): 256-264.
Xu L S, Chen Y T. Temporal and spatial rupture process of the great Kunlun Mountain Pass earthquake of November 14, 2001 from the GDSN long period waveform data. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(1): 112-122.
- [12] 张希, 王双绪, 张晓亮等. 昆仑山与汶川强烈地震对青藏块体东北缘地壳运动及应变积累的影响. 地球学报, 2010, 31(1): 32-42.
Zhang X, Wang S X, Zhang X L, et al. The influence of the Kunlun Mountains and Wenchuan strong earthquake on the crustal movement and strain accumulation in the northeastern margin of Qinghai-Xizang block. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2010, 31(1): 32-42.
- [13] 梅世蓉, 薛艳, 宋治平. 汶川 8.0 级与昆仑山口西 8.1 级地震前地震活动异常特征与启示. 地震, 2009, 29(1): 1-14.
Mei S R, Xue Y, Song Z P. Anomalous seismic characteristics before Wenchuan M_s 8.0 and Kunlunshan M_s 8.1 earthquakes

- and their implications. *Earthquake* (in Chinese), 2009, 29(1): 1-14.
- [14] 陈祖安, 林邦慧, 白武明等. 2001 年 8.1 级昆仑山大震破裂过程及对 2008 年汶川 8.0 级大震孕育发生影响的研究. *地球物理学报*, 2011, 52(1): 108-120.
Chen Z A, Lin B H, Bai W M, et al. A study on the rupture process of the 2001 M_s 8.0 Kunlunshan earthquake and its influence on pregnant process and occurrence of the M_s 8.1 Wenchuan earthquake in 2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 52(1): 108-120.
- [15] Komatitsch D, Erlebacher G, Göddeke D, et al. High-order finite-element seismic wave propagation modeling with MPI on a large GPU cluster. *Journal of Computational Physics*, 2010, 229(20): 7692-7714.
- [16] Komatitsch D, Göddeke D, Erlebacher G, et al. Modeling the propagation of elastic waves using spectral elements on a cluster of 192 GPUs. *Computer Science Research and Development*, 2010, 25(1-2): 75-82.
- [17] Tromp J, Komatitsch D, Hjörleifsdóttir V, et al. Near real-time simulations of global CMT earthquakes. *Geophys. J. Int.*, 2010, 183(1): 381-389.
- [18] 严珍珍, 张怀, 杨长春等. 汶川大地震地震波传播的谱元法数值模拟研究. *中国科学: 地球科学*, 2009, 39(4): 393-402.
Yan Z Z, Zhang H, Yang C C, et al. Spectral element analysis on the characteristics of seismic wave propagation triggered by Wenchuan M_s 8.0 earthquake. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(6): 764-773.
- [19] 王秀明, Seriani G, 林伟军. 利用谱元法计算弹性波场的若干理论问题. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2007, 37(1): 41-59.
Wang X M, Seriani G, Lin W J. Some theoretical aspects of elastic wave modeling with a recently developed spectral element method. *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2007, 50(2): 185-207.
- [20] 严珍珍, 张怀, 杨长春等. 地震激发地球自由振荡过程的数值模拟初步探索. *地球科学进展*, 2008, 23(10): 1020-1026.
Yan Z Z, Zhang H, Yang C C, et al. An initial study of the numerical simulation of the Earth's free oscillations process excited by earthquake. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2008, 23(10): 1020-1026.
- [21] 万永革, 周公威, 郭燕平. 中国数字地震台网记录的昆仑山口西地震的球型自由振荡. *地震*, 2005, 25(1): 31-40.
Wan Y G, Zhou G W, Guo Y P. Spherical mode of the earth free oscillation excited by the earthquake in the west to the Kunlun Mountain Pass recorded by China digital seismograph network. *Earthquake* (in Chinese), 2005, 25(1): 31-40.
- [22] 万永革, 周公威, 郭燕平等. 昆仑山口西地震激发的地球环型振荡. *防灾减灾工程学报*, 2004, 24(1): 1-7.
Wan Y G, Zhou G W, Guo Y P, et al. Toroidal mode of the Earth's free oscillation excited by the earthquake to the west of the Kunlun Mountain Pass. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering* (in Chinese), 2004, 24(1): 1-7.
- [23] 任佳, 陈华静, 王松. 汶川大地震激发的地球球型自由振荡. *中国地震*, 2009, 25(1): 73-80.
Ren J, Chen H J, Wang S. The Earth's spheroidal oscillations induced by the Wenchuan earthquake. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2009, 25(1): 73-80.
- [24] Bassin C, Laske G, Masters G. The current limits of resolution for surface wave tomography in North America. *EOS*, 2000, 81: 897.
- [25] Ritsema J, Heijst H J V, Woodhouse J H. Complex shear wave velocity structure imaged beneath Africa and Iceland. *Science*, 1999, 286(5446): 1925-1928.
- [26] 杨兆, 孙和平, 雷湘鄂. 基于分层结构参数变化的地球自由振荡简正模研究. *地球物理学报*, 2010, 53(4): 815-824.
Yang Z, Sun H P, Lei X E. Study of normal mode based on the changes of stratified structure parameters. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(4): 815-824.
- [27] Komatitsch D, Tromp J. Spectral-element simulations of global seismic wave propagation—I. Validation. *Geophys. J. Int.*, 2002, 149(2): 390-412.
- [28] Komatitsch D, Tromp J. Spectral-element simulations of global seismic wave propagation—II. Three-dimensional models, oceans, rotation and self-gravitation. *Geophys. J. Int.*, 2002, 150(1): 303-318.
- [29] Phinney R A, Burridge R. Representation of the Elastic-Gravitational Excitation of a Spherical Earth Model by Generalized Spherical Harmonics. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1973, 34(4): 451-487.
- [30] Dahlen F A, Tromp J. *Theoretical Global Seismology*. Princeton: Princeton University Press, 1998.
- [31] 严珍珍. 特大地震激发地球自由振荡的数值模拟研究[博士论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
Yan Z Z. Studying Earth's free oscillation processes excited by giant earthquakes using numerical simulation [Ph. D. thesis](in Chinese). Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [32] Luh P C. Normal modes of a rotating, self-gravitating inhomogeneous earth. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1974, 38(1): 187-224.
- [33] Aki K, Richards P G. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1980: 375-425.
- [34] Lapwood E R, Usami T. *Free Oscillation of the Earth*. New York: Cambridge University Press, 1981.
- [35] Phinney R A, Burridge R. Representation of the elastic-gravitational excitation of a spherical earth model by generalized spherical harmonics. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1973, 34(4): 451-487.
- [36] Woodhouse J H, Deuss A. *Theory and Observations-Earth's Free Oscillations*. New York: Elsevier, 2007: 31-65.
- [37] 雷湘鄂, 孙和平, 许厚泽. 利用超导重力观测资料检测地球自由振荡. *科学通报*, 2002, 47(18): 1132-1136.

- Lei X E, Sun H P, Xu H Z. Check of free oscillation signal with SG data. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(18): 1573-1577.
- [38] 雷湘鄂, 孙和平, 许厚泽等. 苏门达腊大地震激发的地球自由振荡及其谱线分裂的检测与讨论. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(4): 504-511.
- Lei X E, Sun H P, Xu H Z, et al. Check of Earth's free oscillations excited by Sumatra-Andaman Large Earthquake and discussions on the anisotropy of inner core. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(6): 909-917.
- [39] 雷湘鄂, 许厚泽, 孙和平. 由 5 个国际超导重力仪台站资料检测到的秘鲁 8.2 级大地震所激发的球型自由振荡现象. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(5): 483-491.
- Lei X E, Xu H Z, Sun H P. Detection of spheroidal free oscillation excited by Peru $M_s 8.2$ earthquake with five international superconducting gravimeter data. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(1): 123-133.

(本文编辑 何 燕)