

# 运用亮度函数 SSA 扫描连续波形资料方法确定 玉树 7.1 级地震前辐射源<sup>\*</sup>

沙成宁, 张晓清, 袁伏全

(青海省地震局, 青海 西宁 810001)

**摘要:** 对 2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级地震前 3 个月青海区域地震台网记录的无地震记录和无仪器故障的连续数字化观测资料进行 FFT 频谱分析, 确定优势频率为 0.03 Hz。通过 Butterworth 滤波器提取 50.2 ~ 0.4 Hz 的波形资料, 运用亮度函数 SSA 扫描方法对提取资料进行扫描计算, 亮度函数空间分布表明青海境内东昆仑地震断裂带内存在周期为 30 s 的辐射源, 并对其呈现的时空特征做了初步的分析。结果显示, 玉树 7.1 级地震前, 由于受到青藏块体向北运动的影响, 随着时间的推移辐射源有沿东昆仑地震断裂带由西向东逐步向玉树 7.1 级地震震中运动的现象。

**关键词:** 亮度函数 SSA 扫描方法; 辐射源; FFT; 玉树 7.1 级地震

**中图分类号:** P315.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2014)增刊-0098-06

## 0 引言

开展强震孕震环境研究, 揭示地下介质受力作用的过程, 分析强震前震源体的空间分布情况, 了解震源体周围受力状态对准确判断强震震情具有重要的意义。过去 10 多年来, 青海省及其周边先后发生了 1997 年 11 月 8 日玛尼 7.5 级、2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级、2008 年 3 月 21 日于田 7.3 级、2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级、2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级、2014 年 2 月 12 日于田 7.3 级地震。针对这些强震孕震环境及前兆特征, 很多学者运用不同方法和不同的数据进行研究分析, 开展了大量的卓有成效的研究工作, 从不同的侧重点给出强震孕育发生特征。祝意青等 (2008) 运用重力观测资料对汶川 8.0 级地震孕震环境进行了分析研究, 结果表明其孕震区域位于重力正负分区的梯度带内。程佳等 (2011) 运用应力触发方法研究了玛尼、昆仑山口西、汶川地震所形成的同震和震后形变场的变化过程与特征, 研究结果表明先后发生的强震是有关联的。陈祖安等 (2011) 运用 (DDA + FEM) 理论和形变资料, 研究了 2001 年昆仑山 8.1 级地震对 2008 年汶川 8.0 级地震孕育产生的影响。郑现等 (2011)

运用宽频带数字地震台网资料, 开展中国大陆中东部地区背景噪声的瑞利波群速度层析成像, 给出了该区域地壳厚度的差异、空间分布以及中强地震的空间分布特征。

在数字地震波形资料分析处理方面, 一些学者开展了震源矩张量反演、震源破裂过程等方面的研究。近年来, 中长周期 (20 ~ 40 s) 资料也逐步得到开发利用, 李文军等 (2006) 使用 SSA (Source Scanning Algorithm) 方法进行地震定位, 研究结果表明该方法在不用精确读取到时和计算理论地震图的情况下达到比较理想的定位效果。丁宁霞和张晓清 (2013) 运用 SSA 方法结合青海区域地震台网观测资料确定 2008 年 11 月 10 日大柴旦  $M_s 6.3$  地震震源破裂面。杨海波 (2010) 开展了基于 SSA 算法的震源破裂过程反演方法系统整理研究。陈长云和任金卫 (2013) 研究巴颜喀拉块体东部活动块体的划分、形变特征及构造, 从构造本和形变的方面给出了巴颜喀拉块体的东向运动存在自西向东的差异性。邓津 (2012) 通过对低频事件的全球分布及汶川震前实例分析, 其研究得出低频滑移事件在各大板块周围普遍存在。张晓清 (2000) 在青海东部及其邻近地区的地震层析成像工作中给出了研究区域的 P 波速度结构。杜海林 (2007) 将聚束能量分析方法和迁

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2014-08-30.

基金项目: 由青海省科技厅基础研究项目 (2013-Z-710) 资助.

移叠加方法应用于宽频带台阵，分析了 2004 年 12 月 26 日苏门答腊—安达曼地震的能量辐射源，得到了震源破裂长度、方向、持续时间和破裂速度。本文在上述工作的基础上，使用青海及周边省份地震台网记录的连续数字地震波形资料中的中长周期成份进行亮度函数扫描辐射源研究，探索 SSA 方法确定中长周期辐射源的空间位置，为确定强震孕震区提供技术支持。

## 1 SSA 方法和原理

亮度函数 SSA 扫描算法年由 Kao 和 Shan (2004) 在北 Cascadia 俯冲带的慢地震研究中提出，他们通过 SSA 方法，根据相应的“亮度”函数扫描，找出慢地震的震源位置和发生时间。SSA 扫描算法是在整个时空寻找可能辐射源的方法，其基本原理如图 1 所示。图中，空间上的点  $\eta$  在  $\tau$  时刻的“亮度”可以由相应台站的理论到时（即  $\tau$  加上相应的走时  $t_{a\eta}$ ,  $t_{b\eta}$ ,  $t_{c\eta}$ ）计算而来，如果某处“亮度”大（图中空心五角星）表明这里有事件发生，如果“亮度”小（实心五角星）表示这里没有事件发生。

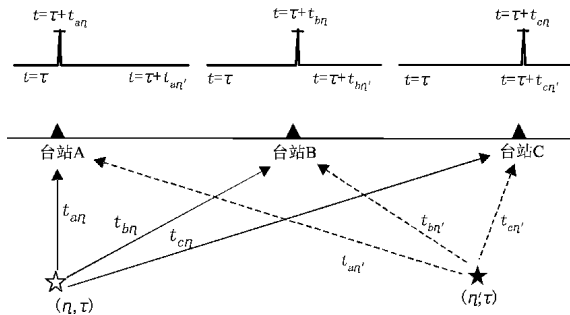


图 1 SSA 扫描法原理示意图

Fig. 1 Sketch map of principle of SSA scanning algorithm

假设一个事件由  $N$  个台站记录到（图 1 中的 A、B、C 点），首先分别归一化每个数字地震台站的记录  $u_n$ ，然后计算某个点（ $\eta$ ）某个时刻（ $\tau$ ）的“亮度”函数为

$$br(\eta, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |u_n(\tau + t_{\eta n})|. \quad (1)$$

式中， $u_n$  为归一化地震记录， $t_{\eta n}$  为从点  $\eta$  处到台

站  $n$  计算的某个最大震相的走时，整个时空中“亮度”函数取最大值时是震源发生的位置和事件发生的时刻。由于使用区域台网的资料，对速度模型的精度要求较高，目前对速度模型认识程度还达不到要求，造成走时计算有一些系统偏差，可以通过平滑的方法来预先处理记录，得到每个台站光滑的“亮度”函数序列为

$$br_n = \text{smooth}(|u_n|). \quad (2)$$

smooth 表示一种平滑方法。对于某一空间点（ $\eta$ ）某个时刻（ $\tau$ ）的“亮度”函数可以表示为

$$br(\eta, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N br_n(\tau + t_{\eta n}). \quad (3)$$

## 2 选取资料处理

使用青海及其周边的甘肃、新疆、西藏数字地震台网共 65 个台站的数据，青海台网地震台站空间分布如图 2 所示。选取 2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级地震前，2010 年 1 月 1 日至 4 月 11 日青海省数字地震台网记录的信噪比较高的连续波形，并挑选出每天 0 ~ 2 时连续无地震记录波形、无高频干扰、无突跳点，仪器工作正常的垂直分量波形进行研究。并对地震记录仪幅频特性进行了核实，所使用资料的地震记录仪大部分为 BBVS-60 和 JCZ-1，带宽分别为 40 Hz ~ 60 s 和 50 Hz ~ 360 s，幅频特性曲线如图 3 所示。

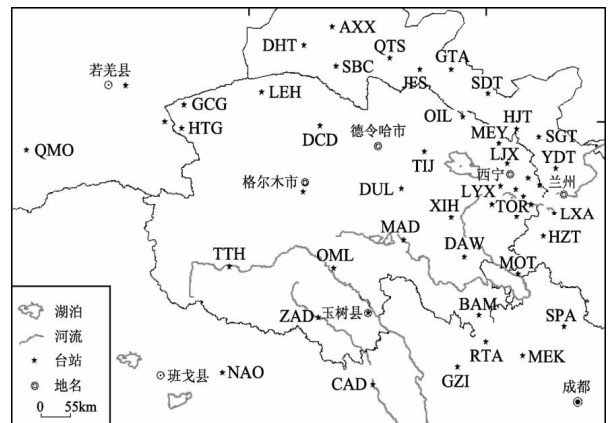


图 2 青海台网地震台站空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of stations in Qinghai Seismic Network

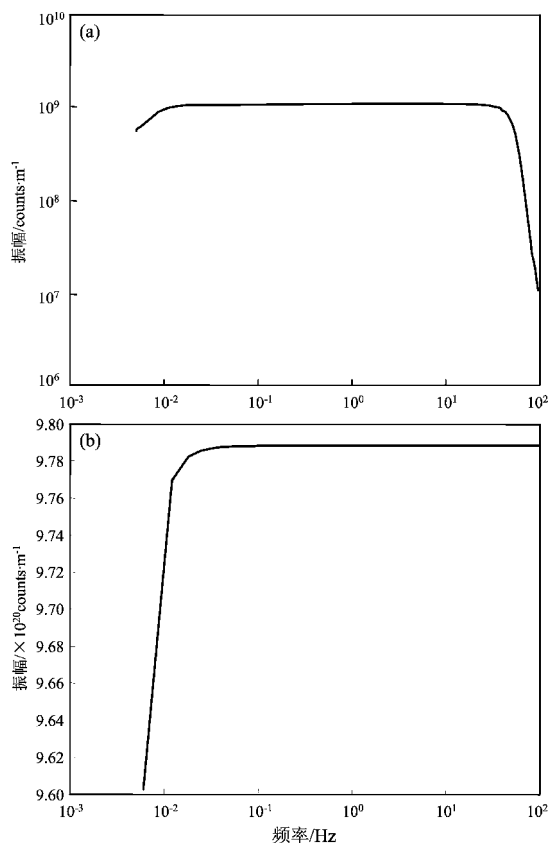


图3 大柴旦 BBVS-60 (a) 和格尔木 JZC-1 (b) 仪器幅频特性曲线

Fig. 3 Amplitude-frequency characteristic of BBVS-60 instrument at Dachaidan Station (a) and JZC-1 instrument at Golmud Station (b)

### 3 结果及分析

运用亮度函数 SSA 扫描连续波形资料方法, 确定玉树 7.1 级地震前 30 s 辐射源的空间位置变化和随时间推移的演化过程。

首先, 通过对所选取资料做 FFT 频谱分析发现 (图 4), 在无地震发生时, 大部分地震台站连续波形资料均存在 0.03 Hz 附近的优势频率。再对连续波形进行滤波, 将其中的对应信号提取出来, 并通过亮度函数 SSA 进行扫描计算, 确定相应周期的辐射源的空间分布。由于 SSA 方法是在所给定时空范围内, 以亮度函数达到最大作为判据确定辐射源的空间位置, 因此, 只需要给定所要扫描的空间范围 (经度、纬度、深度)、相应频段波的波速值、地震台站的空间坐标以及空间扫描的步长, 即可由亮度函数的最大值确定辐射源的

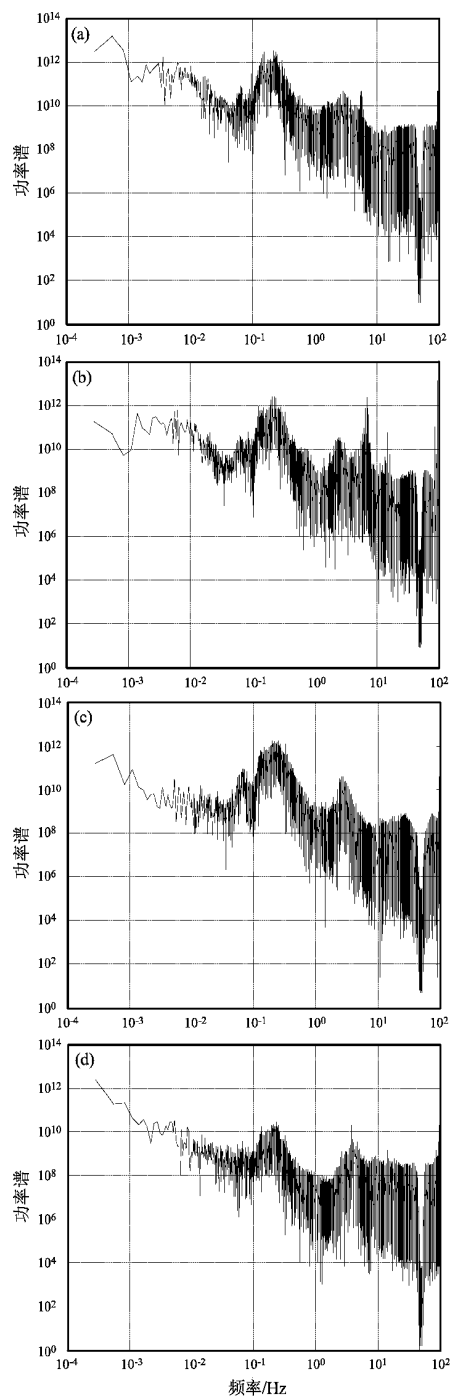


图4 垂直分量连续波形资料 FFT 频谱  
(a) 格尔木台; (b) 班玛台; (c) 大武台; (d) 安西台  
Fig. 4 FFT frequency spectrum of continuous seismic waveform in vertical component  
(a) Golmud Station; (b) Banma Station;  
(c) Dawu Station; (d) Anxi Station

空间位置。本文给出的初始空间范围为 (88.5° ~ 108°E, 30° ~ 50°N), 地壳深度为 0 ~ 70 km。参考余大新等 (2014) 利用 Rayleigh 相速度和群速度

联合反演青藏高原东北缘速度结构, 和郑现等 (2012) 给出的中国大陆中东部地区基于背景噪声的瑞利波层析成像等研究结果, 根据现有计算设备的计算能力, 为了确保研究区内计算结果的空间分辨率达到最好, 确定本文所采用的波速值范围  $2.8 \sim 3.2 \text{ km/s}$ ; 计算网格步长水平向为  $0.1^\circ$ , 垂直向为  $5 \text{ km}$ 。

运用 Butterworth 滤波器提取青海台网连续波形中频率为  $0.2 \sim 0.4 \text{ Hz}$  的波形资料并进行滤波, 如图 5 所示。对提取的资料进行亮度函数扫描, 亮度函数值的空间分布如图 6 所示。从图中可以看出, 2010 年 1 月 10 日亮度函数最高的区域分布在柴达木盆地的西部及西南部, 位于东昆仑断裂带的西段 (图 6a), 最高亮度值达到  $0.74$ , 深度  $15 \text{ km}$ ; 2 月 10 日和 3 月 10 日亮度函数高值区域的主体仍然在东昆仑断裂带的西段, 明显向东昆仑断裂带

以东扩展, 亮度函数最高值分别为  $0.69$  和  $0.68$  (图 6b、c), 深度分别为  $15 \text{ km}$  和  $17 \text{ km}$ ; 4 月 10 日 (玉树地震前 4 天) 亮度函数高值区移至东昆仑断裂带的东段, 并且明显向南扩散, 亮度函数最高值达到  $0.81$ , 深度为  $19 \text{ km}$ ; 4 月 14 日玉树 7.1 级地震发生在亮度函数高值区附近 (图 6d)。

本文计算的亮度函数结果的时空分布特征呈现出最高亮度函数的中心位置基本处于东昆仑断裂带内, 在玉树 7.1 级地震前沿东昆仑断裂逐步由西向东移的现象。陈祖安等 (2011) 对青藏高原及其东侧四川盆地鄂尔多斯块体地区构造块体的研究表明, 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震, 最大水平错距  $4.5 \text{ m}$ , 地表最大位移为  $6 \text{ m}$  左右; 杨国华等 (2008) 根据 GPS 观测资料, 震源区附近的青藏高原向北运动的量级在南端超过了  $20 \text{ mm/a}$ , 面应变以压性为主的方式积

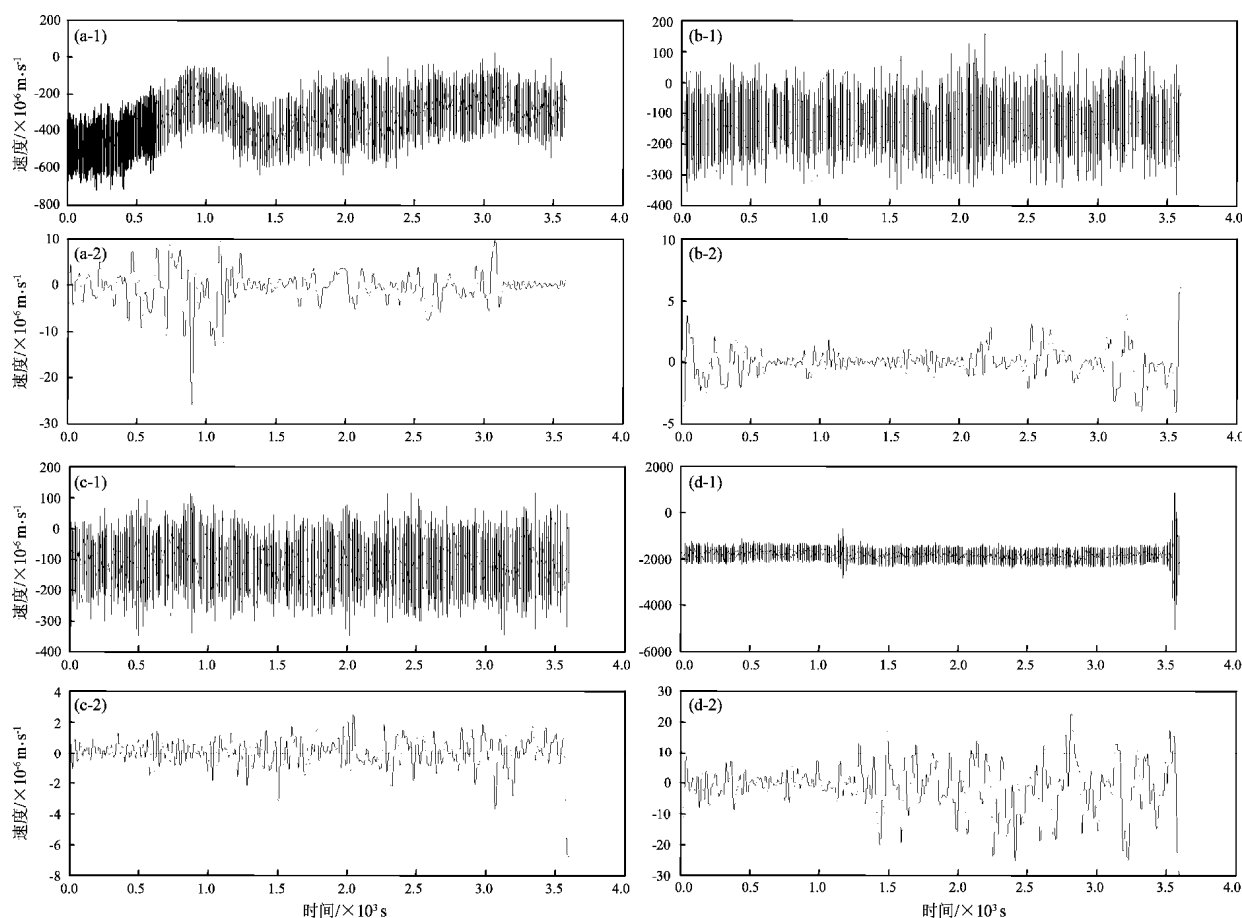


图 5 垂直分量连续波形和滤波后的波形

(a) 格尔木台; (b) 班玛台; (c) 大武台; (d) 安西台

Fig. 5 Continuous waveform and waveform after filtering in vertical component

(a) Golmud Station; (b) Banma Station; (c) Dawu Station; (d) Anxi Station

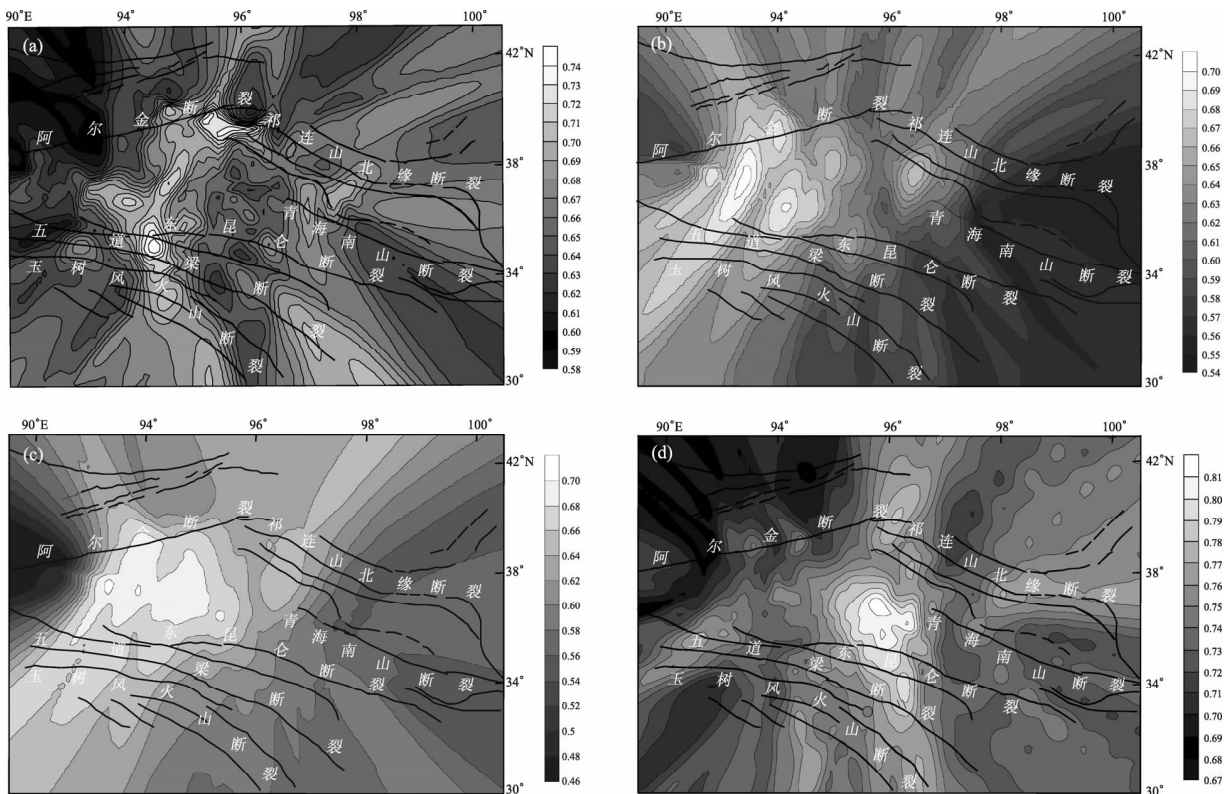


图6 亮度函数值的空间分布

(a) 2010年1月10日00~01时; (b) 2010年2月10日00~01时; (c) 2010年3月10日00~01时; (d) 2010年4月10日00~01时

Fig. 6 Spatial distribution of brightness function value

累应变能, 最大绝对值位于玉树地震和汶川地震震中的周围地区, 上述研究结果表明在昆仑山口西 8.1 级地震之后, 玉树 7.1 级地震之前东昆仑断裂带东部及其周围区域存在较高水平应变, 从构造和形变方面给出孕震证据。此外, 从岩石力学实验角度, 根据邓志辉等 (1995) 孤立型大事件常发生于高能量向低能量的突变带或高能量背景区内的相对低能量区, 高能量不是发震的充分条件, 能量空间分布的差异也是发震的重要条件, 失稳可能从弱的地方开始; 马瑾等 (2008) 对断层变形过程中热场与应变场的关系岩石力学实验研究结果表明, 岩石断层破裂前存在热红外辐射的亮度温度场和温度场的变化。给出的亮度函数结果的时空分布特征为, 空间上表现为最高亮度函数值与玉树 7.1 级地震震中不重合, 玉树地震震中位于辐射源中心的南部, 亮度函数最高值的边缘; 时间上表现为随时间推移辐射源逐步向震中移动。本文给出的结果与近几年对 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震、2010 年 4 月 14 日

玉树 7.1 级地震及昆仑山口西 8.1 级地震的研究结果相一致, 玉树地震之前确实存在 30 s 左右的辐射源。

#### 4 结论及讨论

本文使用 SSA 扫描方法计算了 2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级地震前青海区域台网连续波形资料, 发现在青海东昆仑断裂带及其附近存在 30 s 周期的辐射源, 辐射源随空间和时间的变化对未来的中强地震发震地点有一定指示意义, 期望为今后的孕震区的判定提供一种定量判定方法。

由于本文仅对辐射源扫描开展了二维扫描计算, 辐射源的大小与地震震级的关系、辐射源时空特征随辐射周期的变化、未来中强地震的发震地点位于辐射源的方位等问题有待于做更进一步的研究。此外, 进行频谱分析时, 注意对资料的挑选, 尽量不使用有地震波形记录的资料, 减少提取相应频率的难度。

## 参考文献:

- 陈长云,任金卫. 2013. 巴颜喀拉块体东部活动块体的划分、形变特征及构造意义[J]. 地球物理学报, 56(12): 4126–4140.
- 陈祖安,林邦慧,白武明,等. 2011. 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[J]. 地球物理学报, 54(1): 108–119.
- 程佳,刘杰,甘卫军,等. 2011. 1997 年以来巴颜喀拉块体周缘强震之间的黏弹性触发研究[J]. 地球物理学报, 54(8): 1997–2010.
- 邓津. 2012. 低频事件的全球分布及汶川震前实例分析[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 邓志辉,马胜利,马瑾,等. 1995. 粘滑失稳及其物理场时空分布的实验研究[J]. 地震地质, 17(4): 305–315.
- 丁宁霞,张晓清. 2013. 利用震源扫描方法计算 2008 年大柴旦 6.3 级地震震源破裂过程[J]. 高原地震, 25(4): 26–30.
- 杜海林. 2007. 2004 年苏门答腊-安达曼大地震能量辐射源的时间域台阵技术分析[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 李文军,李丽,陈棋福. 2008. 用震源扫描算法(SSA)研究列车源的运动[J]. 地球物理学报, 51(4): 1147–1151.
- 马瑾,马少鹏,刘培洵,等. 2008. 识别断层活动和失稳的热场标志[J]. 地震地质, 30(2): 364–382.
- 杨国华,张晓东,沈舞春,等. 2008. 昆仑山口西 8.1 级地震震后中国西部地壳水平位移场的变化特征[J]. 地震研究, 31(1): 77–82.
- 杨海波. 2010. 基于震源扫描算法的震源破裂过程反演方法研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 余大新,李永华,吴庆举,等. 2014. 利用 Rayleigh 波相速度和群速度联合反演青藏高原东北缘 S 波速度结构[J]. 地球物理学报, 57(3): 800–811.
- 张晓清. 2000. 青海东部及其邻近地区的地震层析成像[D]. 合肥: 中国科学技术大学.
- 郑现,赵翠萍,周连庆,等. 2012. 中国大陆中东部地区基于背景噪声的瑞利波层析成像[J]. 地球物理学报, 55(6): 1919–1928.
- 祝意青,梁伟锋,徐云马. 2008. 重力资料对 2008 年汶川  $M_s$  8.0 地震的中期预测[J]. 国际地震动态, (7): 36–39.
- Kao H., Shan S. J., 2004. The Source-Scanning Algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space [J]. Geophys. J. Int., 157(2): 589–594.

## Radiant Source before Yushu $M_s$ 7.1 Earthquake Determined by SSA Continuous Scanning Waveforms with Brightness Function

SHA Cheng-ning, ZHANG Xiao-qing, YUAN Fu-quan

(Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

### Abstract

The spectra analysis of the continues digital observation data with no earthquake recording and no instrument fault is done by FFT method in Qinghai Regional Seismic Network in three months before  $M_s$  7.1 earthquake on Apr. 14, 2010, and the predominance frequency of it is confirmed to 0.03 Hz. In the instrument working bandwidth, the waveforms in frequency of 0.2~0.4 Hz was extracted by Butterworth filter, and the extracted data was calculated by SSA continuous scanning waveforms with brightness function. The spatial distribution of brightness function showed that there existed a radiant source in the period of 30 s in the East Kunlun Fault Belt, and the temporal and spatial characteristic of the radiant source was primarily analyzed. The results showed that influenced by the northward movement of Qinghai Tibet Block, the radiant source gradually moved to the epicenter of Yushu  $M_s$  7.1 earthquake from west to East with time along the East KunLun seismic fracture zone before the Yushu  $M_s$  7.1 earthquake.

**Key words:** SSA continuous scanning waveforms with brightness function; radiant source; FFT; Yushu  $M_s$  7.1 earthquake