

杨军、田韬、卢永 2011 前兆波及其地震预测意义 中国地震 27(2) 113 ~ 125。

· 研究综述 ·

前兆波及其地震预测意义

杨军 田韬 卢永

江苏省地震局 南京市中山门外卫岗 3 号 210014

摘要 通过回顾自 20 世纪 60 年代以来地震前兆波的研究与地震预测实践的进展情况,分析利用地震前兆波进行地震预测研究取得的一些有意义的进展及其在科学上面临的困难,分别对前兆波及其定义、前兆波预测大地震事件基本依据、前兆波观测技术概述、前兆波的地震预测意义进行了探讨。文中定义了地震前兆波,以固体均匀弹性中的介质点波动方程和大量震例总结的前兆波阶段性特征,说明利用地震前兆波预测大地震事件具有坚实的理论基础和实践依据。文中阐述了前兆波观测技术的发展要求,并提出了改变目前的被动观测状况、对观测目标区域发生破坏性地震的短期和临震前兆进行主动观测的科学思路;应强化对地震震源区的观测,利用前兆波携带的信息研究震源及其附近地区的介质参数变化,对实现短临地震预测是有意义的。

关键词: 前兆波 地震预测 观测技术 震源区

[文章编号] 1001-4683(2011)02-0113-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

因为地震预测依据的是震源信息,故“以震报震”应是预测强地震的最佳方法。但限于对强地震前的地震信息认识还非常有限,在经历了几十年的地震预测实践之后,人们进一步认识到搜寻震源信息的重要,关于地震预测的可靠理论必须依赖于地球自身提供的证据,在没有收集到大量确凿证据之前,要想正确建立这样一种理论几乎是不可能的。因此,探讨获得震源大量证据的途径就显得十分重要。

地震预测针对的地震应是可能形成灾害的地震,尤其是特大的破坏性地震。鉴于地震过程的复杂性,地壳深部的不可入性和灾害性地震是小概率事件(陈运泰 2009),把预测地壳内强地震的任务分为两部分似乎更实际一些,其解决的方法也必然应有明显区别。第一是在观测并分析研究地震动态和介质性质极缓慢变化的基础上,预测地震的孕育过程,预测孕震区域和强度;第二是在探测一些有地震前兆意义的波动信息(本文简称“前兆波”)基

[收稿日期] 2011-03-08

[项目类别] 地震科技星火计划资助项目 XH1013,中国地震科学联合基金资助课题 304041,中国地震局合同制项目资助 2009020903

[作者简介] 杨军,男,1943 年生,研究员,主要从事地表监测和地表分析预测研究。E-mail: yangjun86@163.net

基础上,分析孕震区快速形变过程引起的效应,预测应力的释放方式,用其预测事件发生的地点和时间。

本文试图对实现第二方面任务的部分内容,即对获得震源大量证据的途径发表点滴见解,旨在拓展大地震短临预测思路。限于篇幅,仅从前兆波及其定义、前兆波预测大地震事件的基本依据、前兆波观测技术概述、前兆波的地震预测意义等几方面表述。

1 前兆波及其定义

1.1 地震前兆波的研究进展

从 20 世纪 60 年代以来,已有诸多关于寂静地震的研究(Kanamori et al, 1979; Bunafedo et al, 1983; Cifuentes et al, 1989; McGuire et al, 1996; Beroza et al, 1990)。伴随着对该类地震研究的逐步深入,有别于所熟知地震波的一类波动信息越来越引起高度关注(Linde et al, 1993, 1996; Kawasaki et al, 2001)。这一类前兆波大多出现在重力仪、倾斜仪、应变仪、水位仪、GPS 等长周期观测仪器的记录(Kostoglodov et al, 2003; Duncan et al, 2007; 张淑亮等, 2003; 杨又陵等, 2003; 黄清华等, 2006)中,随着超长周期地震仪的使用,该类仪器(张雁滨等, 2008)也能记录到前兆波。这类波动常常被地震学家称之为“前驱波”、“前兆波”、“异常脉动”、“蠕动波”、“形变波”、“应力波”等等,一般是大地震前的长周期事件(Kanamori et al, 1979; 吴忠良, 2001; 张晁军等, 2005; 高金哲等, 2005)。

Kizawa(1972)在 GS12 型重力仪光电记录图中发现 1964 年 3 月 28 日阿拉斯加大地震和 1964 年 6 月 16 日新潟地震前 3 天都有前兆波出现,而且一系列特殊脉动叠加在固体潮曲线上,一直持续振动到大震发生。可以认为这是最早见到的“慢前震”记录。近年来,国外此类事件的报告(Creseentini et al, 1996; Kawasaki et al, 2001; Kostoglodov et al, 2003; Duncan et al, 2007)明显增多,表明长基线的水管仪、应变仪、GPS 能够记录到这种现象。熊永良等(2010)还揭示了由 GPS 动态地壳形变获得的大地震波传播速度。杨军等(1984)曾报导菏泽 5.9 级地震前徐州地震台观测到的此类应变异常,并分析了异常形态的近远场关系。国内学者(胡先明等, 2002; 王贤仁等, 2002; 赵根模等, 2001; 许昭永等, 2003; 张艳霞等, 2007)近年来对前兆波记录及其机理的研究讨论逐步深入。

现在学界认为:前兆波与慢地震有关,是由断层慢滑移产生的低频地震波,这些长周期事件后往往伴随着较大地震的发生,故有时被称为长周期前兆或慢前兆、剪切应变前兆;探讨慢地震的种种问题,关键是解决慢(静)地震识别、定位和震源机制的判定问题;要有效地进行慢地震的形变观测和地震观测,并在一些重点地区,通过比较系统的观测,构造比较完整的静地震目录;加强静地震在地震预测研究中的应用,即通过若干静地震与地震的震例总结,从静地震的角度重新考察以往比较熟悉的地震前兆特征;慢地震的深入研究有赖于地震观测仪、应变仪和 GPS、InSAR 的联合观测,同时需要建立一定规模的观测台网,加大观测密度。

这些措施无疑可大大拓展地震观测研究领域、提供预测新思路,但同时还必须正视一些与长周期事件有关的难题。主要有:一是迄今为止,所报道的长周期事件都属于“被观测”事件,即从观测理论、观测仪器到观测台网,还没有一样是专门为此设计的,如果不能开展包含长周期事件在内的主动探测,大地震预测仍然将会非常盲目;二是迄今为止,观测到的形

变波动信息是零散的、不完整的,也是无法比较的,有些就是强台风、局部气压变化等造成的同步波动变化,不是所谓的前兆异常(张雁滨等,2008;傅容珊等,2009;杨军等,1987);三是前兆波观测技术如何在现有观测技术基础上改进发展,才能尽快系统有效地满足据前兆波预测大地震的相关要求,如信息的有效采集、及时传送及瞬间分析等。

本文称之为的“前兆波”即包含这一类波动信息。对于上述某些难题的解决,笔者认为,有效探测地震前兆波是关键,这或许是将复杂的地学问题简单化的途径之一。

1.2 地震前兆波定义

本文对地震前兆波的定义是:前兆波是特指由震源体发出、通过地球介质传播的各种波所固有并夹带的信息。主要分为4类波:声发射波、地震波、电磁波、形变波。

形变波则包含应力应变波、水震波、各类潮汐波以及慢地震散发出的、而地震仪记录不到的多种形式的波。

这些波是同源波;各种波所固有并夹带的信息能随着波动传播到远方;波动信息通过质点振动传播,而中场和远场的质点本身却无任何永久性位移;既然这4类波是同源波,因而它们的波动信息既有可比性,又可以联合分析;通过它们能系统地、长时间地积累震源及其附近不同地区的包含介质参数变化在内的数据,认识寂静地震,对于地震预测具有较高的探索价值。

2 前兆波预测大地震事件的基本依据

2.1 理论基础

一个各面平行于坐标面的均质单位弹性立方体内一点的运动方程可写成(GARLANG, 1987)

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \mu \Delta^2 \mu_i + \rho x_i \quad (1)$$

其中 λ 为拉梅常数, μ 为切变模量(以下统称拉梅系数), $\Delta^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$, x_i 为体内一点的“体积力”分量(x_i 是单位重量的力,量纲与加速度相同)。公式左边的加速度用偏微商形式表示。式(1)表明,如果忽略体力(ρx_i),其与波动方程类似。

鉴于用位移 u_i 表示的体应变 θ 与密度变化有关,那么,就可以提出求解方程(1)的方法,即组成两个波动方程,分别求解以拉梅系数表示的纵波 v_p 和横波 v_s 表达式。

它们表明,体应变或密度变化确实可以传播,传播速度为

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2)$$

旋转或称质点位移的旋度以下列速度传播

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3)$$

事实上,在无界的固体均匀弹性体中只存在以速度 v_p 和 v_s 传播的这两种波:P波表示物质密度变化的传播,其质点位移方向与波传播方向一致,是我们所熟悉的声波。S波表示畸变或形状变化的波动,表示材料体积不发生变化情况下的转动,其质点位移方向与传播方

向垂直,这就是旋转波或剪切波。

公式(2)和(3)描述的是均质弹性体情况下波的传播速度,实际地球问题远比这种理想情况要复杂得多。根据不同的假设条件(冯德益等,1984;王少江等,1989;刘银斌等,1994),上述两个波动方程有不同的解,在粘弹性(或位错)和断裂力学场中,方程的解非常复杂,从下述两项研究中,对长周期波传播的复杂性可见一斑。

赵根模等(2001)归纳了关于“寂静地震”传播的研究结论,其中有“寂静地震”不能用脆性破裂机制进行解释,可用岩石圈内沿深部断层段剪切位错的缓慢传播来模拟,其位移可表示为

$$\Delta U(x, t) = U_x(x, d, t) - U_x(x, -d, t) \quad (4)$$

并假定

$$\Delta U(x, t) = D \left\{ 1 - \exp \left[- \left(t - \frac{x}{v} \right) / T \right] \right\} \quad (5)$$

张弛时间 T 的范围是几分钟至几小时。其位错幅度为几厘米。

冯德益等(1984)认为,粘滑前的预滑和主破裂前的裂缝预扩展,可能是产生长周期形变波的两类波源,并以地壳流变介质模型为基础,对长周期形变波的传播特性进行了理论研究,给出了模型所满足的运动方程为

$$\left(\frac{\partial}{\partial T} - \frac{1}{T_{12}} \right) [(\lambda + \mu) \text{grad} \cdot \text{div} \mathbf{u} + \mu \Delta \mathbf{u}] = \rho_0 \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \frac{\rho_0}{T} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \frac{K}{T_0} \text{grad} \cdot \text{div} \mathbf{u} \quad (6)$$

式中: \mathbf{u} 为位移矢量, $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ 为体积膨胀模量, T, T_0, T_{12} 为相应的弛豫时间, ρ_0 为介质密度。进而求解了两类波动源(断层预滑和断裂预扩张)在这种流变地壳介质中引起的长周期形变波传播的动力学问题,从理论上归纳出了震前长周期形变波在地壳内传播的一些特征。

限于篇幅,本文不展开表述,旨在证明波动信息观测研究有坚实的理论基础。

另外,为引证波动信息之间的可比性,除了均匀各向同性介质参数,如泊松比、杨氏模量、体积模量、波速比及拉梅系数等都有明确的表达式(耶格等,1983)外,还可引进开尔芬参数(Yang, 1985) $f' = \frac{gDr}{19\mu}$, 其中 D, r, g 分别为地球密度、地球平均半径和重力加速度,于是,固体潮汐二阶位的各潮汐因子、重力 δ_2 、地倾斜 γ_2 、经纬度潮汐 A_2 和体应变 η_2 分别用开尔芬参数表示为

$$\delta_2 = \frac{2.5f' + 1}{2f' + 1} \quad (7)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{2f' + 1} \quad (8)$$

$$A_2 = \frac{3.5f' + 1}{2f' + 1} \quad (9)$$

$$\eta_2 = \frac{\nu}{1 - \nu} \frac{3f'}{2f' + 1} \quad (10)$$

公式(7)~(9)说明,可以从重力、地倾斜、体应变、地下流体等不同观测项目中联合考

察地下介质拉梅系数的变化。

上述公式是我们分析前兆波的理论基础。

2.2 观测依据

1975年2月4日海城7.3级地震的成功预测已载入人类文明史册,小震活动性是成功做出临震预测的重要依据之一(吴开统等,1976;朱凤鸣等,1982)。众多文献证明了前兆波的存在及其观测的有效性。比如,Kawasaki等(2001)报道了20世纪90年代宫古、江刺、九慈等台站形变仪器(含伸缩仪、应变仪、GPS)对岩手以东日本海沟观测到的多个慢地震前兆变化,分析了该区域正常地震和慢地震两者的地震距总和,研究了板块边界力与“无震”(指慢地震-笔者注)断裂力的混合问题;Kostoglodov等(2003)展现的墨西哥7个GPS台站在一次慢地震前的同步变化异常明显;Duncan(2007)揭示了在1次4.9级地震前,震中距分别为14km、19km和15km的3个台站记录到的倾斜和应变异常。

与地震孕育、发展、发生相关联的震源区内的变形过程大致服从应力-应变规律。早在20世纪70年代,前苏联的梅谢里柯夫、美国的肖尔茨、日本的藤井阳一郎等根据大量震例总结出形变前兆的阶段性特征,即稳定变化段 α 、加速变化段 β_1 、失稳段 β_2 及震前突变段 γ 。图1是笔者根据日本藤井阳一郎(1974)总结出的应变积累阶段性特征图绘制的。图1中, β 阶段表现出地震前兆快速发展,因而前兆几乎同时在各地出现。在 γ 阶段,地震前兆则从外围地区向震源区集中,出现了临震异常,最后发生地震。

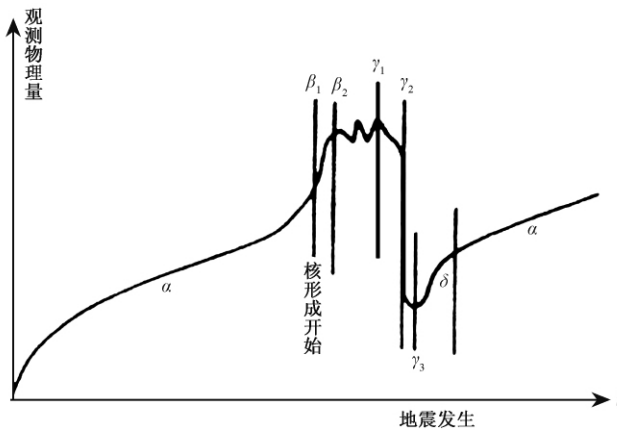


图1 前兆波阶段性特征

根据上述的应变积累特征,观测研究进入 β 阶段的异常区,特别注意追踪已属于大震前短临异常阶段,即 $\beta_2 \sim \gamma_1$ 阶段的区域,密切注视 β_2 、 γ 阶段的到来。

3 前兆波观测技术概述

前兆波的探测、分析和研究,特别是将之用于地震预测,必须以前兆波观测技术为支撑。前兆波观测技术是指对其观测仪器的生产和研制、用于地震探测和预测的台网布设、数字通信、软件以及相关技术问题的总称。

显然,前兆波观测技术不应该脱离整体的地震观测技术,而地震预测的基础必须以预测

理论、观测仪器和布阵对策三者为支撑(图2)。这三者的两两之间,即预测理论和观测仪器、观测仪器和布阵对策、布阵对策和预测理论之间(如命为观测理论、观测技艺和理论对策)的联系也需要建立。这里仅以观测仪器和布阵对策部分内容为例,简述与前兆波有关的问题。

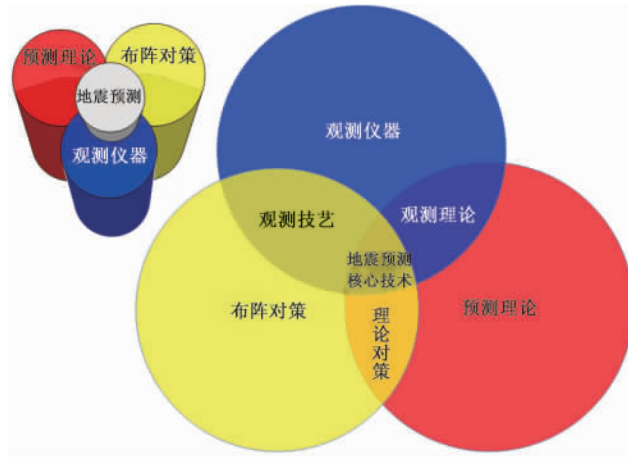


图2 地震预测支撑基础图

3.1 前兆波观测仪器

前兆波观测仪器主要应有各频段配套的测震仪、岩石声发射仪、电磁波仪和形变波动观测仪。人工波源仪器也必不可少。

3.1.1 测震仪

测震仪的运用历史最为长久,仪器也最成熟。目前已研制和应用的从极微震到甚宽带的地震仪,能将地震台观测数据实时传输到数据中心集中处理。从宽带地震仪和甚宽带地震仪记录中,已明显发现有些信息不是以往熟知的常规地震,包含了更多与前兆波有关的信息。

即便如此,按照前兆波观测技术的要求,这些仪器的设计理念还应完善,要使测震仪能够测定慢地震,并定出慢地震震级。为与形变波观测仪器做到无缝连接,研制弹簧——摆系统以外的其他换能形式的地震仪是必需的,这些仪器的观测条件保障必然也不同于我们现已熟知的测震仪观测条件。

3.1.2 岩石声发射仪

岩石声发射(Acoustic Emission,简称AE)是指岩石材料在受荷变形过程中内部晶格错位或微裂纹扩展而引起瞬态弹性波的现象。1963年Goodman首先通过试验证实了岩石也具有Kaiser效应,利用这种声发射的Kaiser效应,可以相当准确地测出岩石三向应力分布的历史。我国于20世纪70年代开始研究和应用声发射。伴随着声发射监测仪器的研制、生产,从初始的单通道声发射监测仪到多通道声发射监测仪器,大量的仪器用于室内试验和现场监测,声发射的Kaiser效应在岩土工程领域中的研究和应用也取得了很大进展。

郑治真(1994)运用慢速磁带记录仪,通过对山东莒县和云南洱源地声台网长期连续记录的研究,确信存在前兆性地声,如将可听地声、地声频度、地脉动频率变化等相结合,能够对短临地震预测提供重要信息;可听地声频率为70~120Hz;地声产生机制是微破裂。

声发射已广泛应用于地应力测量、地下洞室稳定性分析和岩爆预测。有些仪器也比较接近岩石声发射观测的要求。如使用日本富士传感器的 PXWAE 全波形声发射检测仪信号带宽为 10Hz ~ 4MHz, 满足岩石声发射频率范围。厂家已可提供高灵敏度、超小型、高温型、防水型等 40 余种声发射传感器和 PXDAQ 声发射采集卡。采集卡与计算机的数据通讯可实现速率达 132M/s 的波形信号传输, 在连续采样时也可获得不低于 80M/s 的波形通过率。但如何用于地震前兆波观测, 还需改进和完善。

另外, 虽然近年来在岩石声发射监测技术的设备研制、开发和应用研究方面已取得很大成就, 但岩石声发射技术是理论研究落后于工程实际的少数学科, 特别是对于岩体失稳的声发射监测预测应用方面, 迄今为止仍然是一大难题(陈景涛, 2008; 秦四清等, 1993; 彭新明等, 2000; 梁艺军等, 2009)。

研制和采用人工声波源对需观测的岩石体发射并接收声波将是另一大难题。

3.1.3 电磁波仪器

地球本身是一个磁体。地壳中含有大量的石英成分, 石英晶体受压时可能产生静电, 形成静电场, 不同区域的静电荷相互流动形成电流, 变化的电场产生变化的磁场。另外, 有些物质相互摩擦会产生静电, 当岩石中含有某些特定的成分时, 在岩体发生断裂、错位和滑动的过程中, 会因摩擦而产生大量的静电荷, 产生较强的大地电场、大地磁场和大地电流。

电场和磁场的瞬时表达式为(韩自豪等, 2007)

$$E(z, t) = \operatorname{Re} \left[e_x E_x e^{i\omega t} \right] = e_x E_m e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \quad (11)$$

$$H(z, t) = \operatorname{Re} \left[e_y H_y e^{i\omega t} \right] = e_y \frac{E_m}{|\eta_c|} E_m e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z - \psi) \quad (12)$$

可见, 电场和磁场的振幅以因子 $e^{-\alpha z}$ 随 z 的增大而减小。 α 是表明每单位距离衰减程度的系数, 称为电磁波的衰减系数; β 表示每单位距离落后的相位, 称为电磁波的相位系数。在导电介质中, 波的传播速度(相速) $v = \frac{\omega}{\beta}$ 与频率有关, 电磁波的传播速度随频率改变的现象, 称为色散效应。

国内应用的 DPJ、ULF、DJY 等型号的电磁波信号检测仪器已有 20 多年的历史, 在地震电磁信息观测和研究方面积累了不少经验。电磁波仪器如何能够剔除地面干扰、使探头更好地接收到地下深部的电磁波信息、提高采样率至 50Hz 以上, 这些都是电磁波仪器研制的难点(赵国泽等, 2003)。

通过卫星观测得到 ULF/ELF/VLH/LF 电磁异常, 也是研究电磁波与地震关系的重要途径。鉴于高空磁场是影响大地磁场的重要因素, 研究电磁微波是必须的。微波电磁理论研究的主要特点是研究对象的特征尺寸(大气层等效高度)与电磁波波长可以相比拟, 并以电磁波与研究对象(“谐振”型)的强烈相互作用为主要研究内容。不难看出, 微波电磁理论最适合于处理岩石圈-大气层-电离层耦合的问题。

我们的问题是, 如何将发生在地下数千米以至几十千米的地震电磁波信息检测、分离出来, 并发现将其用于预测地震的规律, 施行地震预测。所以已研制或待研制的仪器, 从设计思想、实现记录和数据传输的细节都必须充分顾及地震预测要求。

3.1.4 地形变仪器

为便于叙述,这里的地形变是指传统大地测量、空间测量、天文观测、重力、地倾斜、地下流体、地应力应变测量以及地球自由振荡观测的总称。之所以把地下流体也归并到地形变类,只是因为地下流体变化的根本原因是地球固体骨架变形,不涉及学科评价。

地形变测量由于仪器种类繁多、仪器系统设计原理多样、覆盖频段甚宽等特点,因而观测到的地形变信息也将是最丰富的。

观测形变波的仪器可在现有形变仪器基础上加以改进和研制,关键点有:

①重视仪器的频率响应。即必须注意使仪器在工作频率下工作时有良好的频率响应,它测得的是仪器响应频段内的地壳动态甚至是微动态的真实变化。所以,这些仪器的研制,不仅要在传感器(或探头)上下功夫,而应当作为新仪器去研制,特别是在波谱的频率响应上下功夫(李建中等 2008;杨军 2001、2002;黄福祥等 2004;邓涛等 2008)。

②观测形变量和探测叠加其上的波动信息均是观测目标。这既需要获得更多信息,特别是获得波动信息,也应注意对不同频段波动信息的检测,注意与测震仪频段的超覆盖。为了记录波动信息,仪器采样率应优于秒级。切变仪研制也是重点,它可以和声发射仪器一道,只分别对横波和纵波提供单一记录,使研究简化。

③能够接收地震人工振动波源信息。

④可充分利用大地脉动和固体潮检验仪器的工作状态。有的形变仪器甚至可自动进行理论固体潮改正。

3.1.5 人工波源仪器研制

这里的人工波源仪器是指可人工控制、能分别对地球一定深度发射振动、声波或电磁波这 3 类波动之一的精密振动波源仪器。

借助人工震源,或者应用地表散发的波动源(如固体潮、地表噪声、电磁波等)主动探测地下介质结构,并监视其动态变化是地震学家的梦想。美国 Bolt 公司的 Stephen Chelminski 于 1963 年发明了气枪震源。其工作原理是通过空气压缩机将压缩空气注入气枪中,后在水下通过电磁阀控制将压缩空气瞬间释放,从而激发地震波。前苏联和日本研制的精密可控常时震源系统(ACROSS)期望能动态地监测地下活断层的运动。

近年来,我国已在运用气枪震源(陈颢等 2007)和研制精密主动地震监测(PASM: Precisely and Actively Seismic Monitoring)系统(王洪体等 2009)方面加快了进程。精密主动地震监测系统以与 GPS 保持同步的电子系统控制的旋转质量体作为地震信号源,产生精确的、高度可重复的地震信号。这种信号经过地下介质传播到观测点被数字地震仪器记录,由专门的计算方法提取,可以获得监视地下介质结构的有效信息,从而实现了对地下介质结构及物性的主动精确动态监测。配合高灵敏度的数字观测系统,再加上数据处理和信噪比增强技术,可以在 150km 以外获得有效纪录,测量走时变化的精度优于 1ms,进而监视地下介质的速度变化和介质参数的变化,是一种前景光明的新型地震学研究方法。

测震类人工波源仪器的运用既可以标定群体测震仪的放大倍率,统一标度,又可以探测地下被测体接收波动的情况,用以探测孕震体及其力学状态的变化,后者对于前兆波探测及地震预测意义重大。

形变类人工波源仪器不必单独研制,可和测震类人工波源共用,所不同的只是形变类人

工波源仪器更需要发出甚低频波。

电磁人工波源研制对于检测电磁仪器记录的真实性,探测孕震体在断裂、错位和滑动过程中的电磁波信息都是十分必要的。

3.2 前兆波观测台网布设原则

前兆波观测台网是定向的、动态的综合台网。所谓定向,是仅为探测某一震源体服务;所谓动态,系指台阵布设因震源体变化的检测需要而变化;综合是指观测理念、观测方法等等的大综合。为预测某一块体(目标区)发生破坏性地震的时间和地点,捕获短期和临震前兆,为此,前兆波观测台网布网原则及仪器布阵方式除了满足现有场地、条件保障外,还应遵循如下几点:

①台网几何中心应是孕震区域中心。目的是使台网能够既充分而全面,又对称分布地捕捉到地震短临前兆信息,以便能有效地运用力学模型反演震源参数。要特别提及的是,随着观测研究的深入,孕震区域中心可能变化,台网几何中心应作相应调整(无疑下述的布阵也必须作相应变动)。

②围绕台网几何中心在地平面四象限对称建立多个立体台阵。要尽可能使监测目标区布设为 12 个以上、呈象限对称分布的立体台阵;每一台阵由多个地面、井下(有条件的可建空间和海洋)观测点组成;每个台阵必须布设井下观测点,观测点最好布设成多个间距互为等边三角形的深井,且每一井中要有深、中、浅 3 层仪器安装段。流动监测也是布阵形式之一。

③开展人工波源探测。每个监测场地(目标区)的每类人工波源至少应有 3 台以上,用于人工探测和对仪器群体标定,也是精细了解震源体力学结构和介质参数变化的必要方法。

④数据中心运用超大型计算机处理数据。由于需要接收和处理大量的波形数据,要求每小时作 1 次参数预测,且据已有的经验,突发临震信息往往在主震前很短时间,所以,必须运用高速、超大型计算机处理数据。

⑤具备仪器检测和试验功能。前兆波观测台网应具有检测和试验功能,能够定期检测和标定各类仪器,能提供波形仪器试验场地和检测平台,深井和地面仪器可以更换和重新组合观测阵列,深井仪器与井壁可耦合试验,4 类波形仪器之间可进行共性参数比测等等。

前兆波观测台网布网示意图 3。

4 前兆波的地震预测意义

4.1 前兆波信息的普遍性

前兆波应该比前震更普遍,因为前兆波有明确的物理意义,这些信号来源于大地震震源及其附近,信号出现时间较为集中在震前数天或更长一段时间内;信号是以一定速度从孕震体向外传播的波动,可以被周围不同台站接收到,进而对辐射源作概略定位;前兆波波动信息较普遍,比如大多数地震没有前震,可是统计表明寂静的地震比平常所说的地震要普遍得多。

因此,运用第 3 节的前兆波专用探测仪器和相应台网,必然可以获得震源及其附近地区的大量地下信息,除了可用以编制含寂静地震在内的全地震目录、获取地下介质结构及物性特征数据、研究局部区域地壳运动规律外,还具有大地震事件的预测意义。

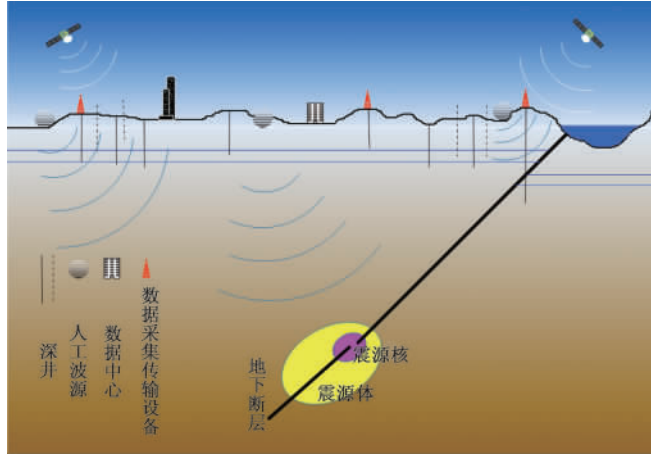


图3 前兆波观测台网布网示意图

4.2 大地震事件预测意义

鉴于第2节中前兆波预测大地震事件的理论基础分析,根据岩石力学试验结论,强地震短临预测技术的关键是要掌握震源核的成长过程。

可将震源区的拉梅系数 λ 和 μ ,以及总能量 U 、裂纹扩展力 G 作为地震预测的依据。 λ 和 μ 可以直接从4种自然波动和人工波源的前兆波动信息中通过解算得到,这将自然而然地把4种自然波动观测量有机地结合在一起。同时 μ 还是解算总能量 U 必不可少的参数之一。总能量 U 、裂纹扩展力 G 的求取要复杂一些。

根据王仁等(1979)的岩石蠕变方程,岩石蠕变破裂全过程中 t 时刻的应变可表达为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_1(t) + V_t + \varepsilon_3(t) \quad (13)$$

式中 ε_e 为瞬时弹性应变, $\varepsilon(t)$ 是瞬时蠕变, V_t 称为稳态蠕变, $\varepsilon_3(t)$ 是加速蠕变。地震发生在加速蠕变阶段或从稳态蠕变到加速蠕变过渡的过程中。

地震发生前一刻震源处所积累的能量可由

$$U_0 \approx \frac{\tau^2}{\mu} V \quad (14)$$

求得,式中 τ 为极限切应力, μ 为切变模量, V 是震源体积。据该式可以算得震源体积积累的能量,能够大致分析震源核的成长过程。

为了适应震源体的快速变化,必须用自动化程度极高的计算机自动分析系统自动预测。自动分析系统主要依据能量守恒定律,因为,能量守恒定律是自然界的重要规律。

对于静态的裂纹扩展系统,总能量 U 与外加载荷作功 W_L 、弹性体中储存的应变势能 U_E 及随着裂纹扩展出现的裂纹新表面能 U_S 之间的关系式为(陈颢等 2001)

$$U = (-W_L + U_E) + U_S \quad (15)$$

式中的 W_L 可看作加载系统势能的减少。

根据格里菲斯能量平衡概念,对于单位宽度平板中的裂纹,可以定义裂纹扩展力 G (也叫做该裂缝系统的机械能释放率),它是裂纹长度 c 的函数,即

$$G = - \frac{d}{dc} (-W_L + U_E) \quad (16)$$

引入裂纹扩展阻力 R , 一般是材料常数, 定义 G_c 是临界机械能释放率, 有

$$R = \frac{d}{dc} U_s = G_c \quad (17)$$

公式(17)是基于能量守恒定律的预测材料断裂的准则,也是地震预测的重要依据。通过反演将前兆波观测值与式(17)联系起来。

这样,基于目标区的拉梅系数 λ 、剪切模量 μ 、总能量 U 和临界机械能释放率 G_c 等参数变化的“量测”(实际是通过前兆波资料解算),即可实时了解震源核的成长过程,而且可以这样来定义短临预测:根据每小时反演求出的弹性参数发布参数预报,当岩石裂纹扩展力 G 达到某一标准时播发预警,接近临界机械能释放率时播发警报。

依据上述观测理论及所测得的资料可以开展强地震的短临预测探索,应充分注重对震源区中长期预测的先导作用(张国民等,2003),始终遵循以震源体演化信息来预测强震孕育过程,不断跟踪图1中从 β_1 阶段向 γ_1 点的变化历程,运用公式(4)、(6)、(7)~(12)将上述提取的这些参数变化通化(兼合同化、融合及归一化),通过公式(15)~(17),随时依据历程判断标准,探索包含时间、地点、震级、发震概率等参数的短期或者临震预测。

5 结语

前兆波的探测与研究应是实用地震学的重要内容,实用地震学呼之欲出。实用地震学必将模糊测震学科和前兆各专业之间的界限,使之有机结合成一体,目的都是量测和预测地震;前兆项目的综合再也不是拼盘式的综合,而是以共同探测孕震区快速形变过程引起的效应为基础。

在研制能够探测地震前兆的波动信息仪器并布设有效观测台网,捕获前兆波的基础上,分析孕震区快速形变过程引起的效应,预测积累应力的释放方式,用其预测事件的地点和时间,这应该是一条获得震源大量证据并进行强地震短期和临震预测探索的有益途径。

尚需指出,本文仅是对前兆波预测大地震思路的一种综合表述。欲使前兆波预测大地震实用化,还需开展大量研究。如在本文第3节中已提及:“地震预测的基础必须以预测理论、观测仪器和布阵对策三者为支撑。”这三者的两两之间,即预测理论和观测仪器、观测仪器和布阵对策、布阵对策和预测理论之间还有太多的缺项需要补齐、太多的联系需要建立。笔者以为,深入研究这些问题,或许是使前兆波预测大地震实用化的关键所在。

致谢:审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见和建议,谨表谢忱。

参考文献

- 陈运泰 2009 地震预测:回顾与展望,中国科学 D 辑:地球科学 39(12),1633~1658。
 陈颢、张先康、丘学林等 2007,陆地人工激发地震波的一种新方法,科学通报 52(11),1317~1321。
 陈颢、黄庭芳 2001 岩石物理学,117~119,北京:北京大学出版社。
 陈景涛 2008 岩石变形特征和声发射特征的三轴试验研究,武汉理工大学学报 30(2),94~96,118。
 邓涛、廖成旺、丁炜等 2008 地形变测量中光纤传感新方法,大地测量与地球动力学 28(6),132~136。

- 冯德益、潘琴龙、郑斯华等,1984,长周期形变波及其所反应的短期相临震地震前兆,地震学报,6(1),41~57。
- 傅容珊、万柯松、崇加军等,2009,地震前兆还是其他因素?——与“汶川大地震宽带地震仪短临异常及成因初探”作者商榷,地球物理学报,52(2),584~589。
- 高金哲、吕政、张洪艳,2005,地震前驱波观测与研究进展,华南地震,25(1),53~58。
- 胡先明,2002,四川深井水位记录昆仑山8.1地震,四川地震,4,39~42。
- 黄清华、刘涛,2006,新岛台地电场的潮汐响应与地震,地球物理学报,49(6),1745~1754。
- 黄福祥、杜振辉、李朝阳等,2004,激光多普勒效应地震波实时测量技术的研究,新技术应用,3,17~19。
- 韩自豪、牛立军、魏文博,2007,电磁方法的拟地震解释,辽宁工程技术大学学报,26(6),834~836。
- 李建中、饶云江、冉曾令,2008,基于可调环光纤激光器的动态应变传感系统,光电子·激光,19(2),146~148。
- 梁艺军、刘俊峰、张巧萍等,2009,环形腔全光纤F-P干涉仪的声发射检测,光学精密工程,17(8),1825~1830。
- 刘银斌、李幼铭、吴如山,1994,横向各向同性多孔介质中的地震波传播,地球物理学报,37(4),499~513。
- 彭新明、孙友宏、李安宁,2000,岩石声发射技术的应用现状,世界地质,19(3),303~306。
- 秦四清、李造鼎,1993,岩石声发射技术概论,成都:西南交通大学出版社。
- 王贤仁、卢艳清,2002,倾斜扰动与短临地震预报,地震研究,25(1),20~24。
- 王仁、熊祝华、黄文彬,1987,塑性力学基础,398~440,北京:科学出版社。
- 王少江、殷志山,1989,长周期形变波与慢地震,地壳形变与地震,9(3),1~10。
- 王洪体、庄灿涛、薛兵等,2009,精密主动地震监测,地球物理学报,52(7),1808~1815。
- 王仁、丁中一、殷有泉,1979,固体力学基础,340,北京:地质出版社。
- 吴忠良,2001,地震学中的“暗物质”——“静地震”与地震预测研究的未来,国际地震动态,9,1~5。
- 吴开统、岳明生、武官英等,1976,海城地震序列的特征,地球物理学报,19(2),95~109。
- 熊永良、黄丁发、徐韶光等,2010,长距离动态GPS数据处理方法与汶川地震引起的动态地壳形变特征分析,武汉大学学报·信息科学版,35(3),265~269。
- 许昭永、杨润海、胡毅力等,2003,慢地震慢前兆的机制研究,地震,23(2),12~19。
- 杨军、邓世榜、拾礼勤等,1984,菏泽5.9级地震前徐州台观测到的应变异常,地震,2,10~15。
- 杨军、张学阳、张惠等,1987,一次非地震前兆的异常变化,地震研究,10(5),583~590。
- 杨军,2002,缝合地震观测和大地测量的观测空间,国际地震动态,10,17~19。
- 杨军,2001,依据波动信息预报地震,地震学刊,21(4),1~5。
- 杨又陵、赵根模、高国英等,2003,2001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,9,1~4。
- 耶格J C等著,中国科学院工程力学研究所译,1983,岩石力学基础,135~139,北京:科学出版社。
- 张雁滨、蒋骏、廖盈春等,2008,宽频地震计及倾斜、重力仪对长周期波动信号的综合观测,地震学报,30(6),626~633。
- 张晁军、石耀霖、马丽,2005,慢地震研究中的一些问题,中国科学院研究生院学报,22(3),258~269。
- 张艳霞、何晖,2007,岩石声发射的Kaiser效应研究进展,地下空间与工程学报,3(6),1089~1093。
- 张国民、尹京苑,2003,地震预报研究发展展望,防震减灾工程学报,23(4),83~90。
- 张淑亮、范雪芳,2003,井水位长周期事件记录及其机理的讨论,地震,23(4),85~90。
- 赵根模、杨港生、陈化然,2001,寂静的前震与地震预测,地震,21(1),69~77。
- 赵国泽、汤吉、邓前辉等,2003,人工源超低频电磁波技术及在首都圈地区的测量研究,地学前缘,10(1),248~257。
- 郑治真,1994,我国前兆地声的观测与研究,地球物理学报,37(1),251~260。
- 朱凤鸣、吴戈、钟以章等,1982,一九七五年海城地震,14~17,北京:地震出版社。
- GARLANG G D 著,陈颢、唐晓明、赵晓敏译,1987,地球物理学引论-地幔、地核和地壳,29~34,北京:地震出版社。
- Bunafedo M, Beschi E, Dragoni M, 1983, Viscoelastic stress relaxation and stress on deep fault sections as an impossible source of very long period elastic waves, J Geophys Res, 88(B3), 2251~2260。
- Beroza G C, Jordan T H, 1990, Evidence for slow earthquake rupture from 10 years of continuously monitored normal-mode activity, Seismological Research Letters, 61, 27。
- Cifuentes I L, Silver P G, 1989, Low-frequency source characteristics of the strong 1960 Chilean earthquake, J Geophys Res, 94, 643~663。

- Creseentini L, Amomso A, Scarpa R, 1996, Constraints on slow earthquake dynamics from a swarm in Central Italy, *Science*, **286**, 2132 ~ 2134.
- Duncan C, 2007, An overview of continuous strain and tilt measurements in the United States, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **53**, 157 ~ 182.
- Iglesias A, Sinsh S K, Lowry A R, et al, 2004, The silent earthquake of 2002 in the Guerrero seismic gap, Mexico ($M_w = 7.6$): inversion of slip on the plate interface and some implications (Submitted to *Earth and Planetary Science Letters*).
- Kanamori H, Stewart G S, 1979, A slow earthquake, *Phys Earth Planet Inter*, **18**, 167 ~ 175.
- Kawasaki I, Asai Y, Tamura Y, 2001, Space-time distribution of interpolate moment release including slow earthquakes and the seismo-geodetic coupling in the Sanriku-oki region along the Japan trench, *Tectonophysics*, **330**, 267 ~ 283.
- Kizawa T, 1970, Recording with Askania gravimeter before and after important earthquake, *Z Geophysik*, **36**, 519 ~ 521.
- Kostoglodov V, Sinsh S K, Santiago J A, et al, 2003, A large silent earthquake in the Guerrero seismic gap, *Mexico Geophys Res Lett*, **30**(15), 1807.
- Linde A T, Gladwin M T, Johnston M J S, 1996, A slow earthquake sequence on the San Andreas fault, *Nature*, **383**, 65 ~ 68.
- Linde A T, Gladwin M T, Johnston M J S, 1993, Borehole strain measurements of molid-earth-tidal amplitudes, *US Geol Surv*, **1550** (C), 81 ~ 85.
- Yang, 1985, Comprehensive tidal observation and unified prediction of earthquakes, *Earthquake Research in China*, **1**(1), 65 ~ 70.
- McGuire J J, Ihmle P F, Jordan T H, 1996, Time-domain observations of slow precursor to the 1994 Ronmanche transform earthquake, *Science*, **274**, 82 ~ 85.
- 藤井陽一郎, 1974, 地震発生前の異常地殻変動継続時間とマグニチュードとの関係, *地震(日)*, **27**(2), 197 ~ 214.

Precursor wavess and its prediction significance of strong earthquake

Yang Jun Tian Tao Lu Yong

Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China

Abstract The paper reviews the development and results of seismic precursory waves since the 1960s. The significant progress has been made in the development of earthquake prediction research using precursory waves. But there are still some fundamental problems which need working out. The authors discuss the seismic precursory waves from such respects as its definition, basis for the strong earthquake prediction, observation technology, predicting significance, etc. Definition of seismic precursory waves is explained. The characteristics of seismic precursory waves change with time according to some seismic examples, which is also proved from both the theory of isotropic elastic wave equations and the practice of precursor observation. It is reasonable and scientific that the strong earthquake prediction can use precursory waves. The paper elaborates on the development of precursory wave observation technology. In order to actively gain abnormal source signal, the authors suggest that the present observations should be changed to better enhanced monitoring of the focal region. Since seismic precursory waves carry lots of information about medium parameters variations in the focus and its nearby area, it is significant to apply precursory waves to the short-term earthquake prediction.

Key words: Precursor waves Earthquake prediction Observation technology Focal region