

利用相关检测进行地震波速 变化精确测量研究进展

罗桂纯¹, 葛洪魁², 王宝善², 胡平¹, 陈颢²

(1. 北京市地震局, 北京 100080; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要 通过地震波速度变化的精确测量, 来监测地下应力随时间的变化, 是进行地震物理预报的有效途径. 介绍国内外关于地震波速变化精确测量所取得的各项结果和在地学中的应用, 讨论了相关检测法的原理和应用. 利用人工震源激发地震波, 布设测线接收地震信号, 将地震学和信息科学相结合, 利用相关检测法, 能有效排除干扰和不确定因素, 进行地震波速度变化的精确测量, 解决地震学一直以来面临的难题. 本研究小组利用电落锤人工震源激发地震信号, 以布设在同一条射线路径方向上的仪器接收, 进行了 30 天连续观测直达波速度变化的实验研究, 速度变化达到 $1.00E-05$ 的精度.

关键词 速度变化, 地下应力, 地震物理预报, 相关检测

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)02-0056-07

Process in precise measurement of seismic velocity variation by correlated detection

LUO Gui-chun¹, GE Hong-kui², WANG Bao-shan², HU Ping¹, CHEN Yong²

(1. Earthquake Administration of Beijing Municipality, Beijing 100080, China

2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract To monitor interior stress's variation which is variety by time is an effective approach of seismic physical forecast. This paper reviewed the results concerning the precise measurement of seismic velocity variation and application, discussed the principle and application of the correlated detection. Making use of active seismic source, recording seismic signal by survey disposal, and combining the seismology with communication science, using correlated detection can get rid of disturb and uncertainty factor. The approach can resolve the problem about precise measurement of seismic velocity, and offer method for seismic physical forecast. Our group carried out a field experiment to attain seismic signal by active source, and we received seismic wave by instruments on the same ray. This field experiment lasted on 30 days to detect the velocity variation of p wave, the precision of the velocity variation achieved to $1.00E-05$.

Keywords velocity variation, interior stress, Seismic physical forecast, correlated detection

0 引言

从经验预报转变到物理预报是解决地震预报的一个有效途径, 因此, 必须掌握地下介质的物理参数. 地球深部应力随时间的变化是理解地震发生机理, 进行地震预报的最重要物理依据之一. 但是应力测量并不容易, 尤其是在震源深度. 一个潜在的有效

方法是通过观测地震波速随应力的变化来实现. 1975 年海城地震预报的成功, 虽然不完全是根据波速的异常, 但从实际上极大地鼓励了利用前兆预报地震的信心: 只要我们能够测量地下岩石的波速、波速比等随时间的变化, 利用这些意义明确的参数进行物理预报是有可能的^[1~4].

通过对地震波速变化的监测, 了解地壳内部应

收稿日期 2007-02-10; **修回日期** 2007-06-20.

基金项目 国家自然科学基金重点项目(NSFC40234038)和地震联合基金(105108)联合资助.

作者简介 罗桂纯, 女, 1980 年生, 2003 年毕业于云南大学地球物理系, 2006 年硕士毕业于中国地震局地震预测研究所, 现在北京市地震局工作, 主要从事地震数字信号处理和震源研究等工作. (E-mail: gchluo@163.com)

力积累来预报地震,是近代地震学很早就提出的想法.关键是要找到一种能够精确连续向地下发射地震波的震源.天然地震固然可以利用,但其位置不易准确确定,且在同一地点发生相同震源机制地震的可能性很小,重复性太差,能产生足够能量让远方可以接收到的地震数目也远远不够.震源是产生地震信号的源头,震源所产生的地震波信号质量将直接影响地震研究的效果.到目前为止,出现了各种人工震源,如炸药震源、气枪震源、落重震源、锤击震源、气爆震源、撞击式震源、电火花震源、可控震源等.与天然地震相比,人工震源易控制、定位精度高、重复性好,在不同的环境和尺度的实验场,可以选择最为合适的震源^[5].

随着数字化地震仪器的发展,各个固定台站和流动台站,都使用了高灵敏度、高采样率、大动态范围的三分量地震仪,使得地震仪器能记录到高质量的地震波信息.测线布设和台阵布设理论和实践的不断发展和完善,为开展中尺度、大尺度地震波速测量实验提供了技术支撑.

从原理上讲,深部应力随时间的变化可以利用地震波速度的变化来观测,但由于这种变化发生在地球深部,而且,变化量很微弱,对地震波观测能力和波速变化观测精度的要求很高^[5~7].现有的地震波速度观测方法都无法达到要求,因此,大幅度提高地震波速的观测精度,一直以来都是地震科学的一个难题.如何解决这一难题?信息科学的理论和方法给我们提供了一些启示.相关检测技术,是十九世纪在信息论的基础上发展起来新的检测技术,在信息科学领域已经得到成熟运用.将在信息科学中已经得到广泛应用的相关检测技术,引入地震观测,为解决地震波速度变化高精度测量提供可能.

1 地震波速度变化精确测量的国内外研究现状

地震波速度是反映地下介质物性的一个重要物理参数,地震波速测量在地震学中是一项非常重要的工作,是进行地震物理预报的必不可少的物理量.由于波速和应力的相关性,因此,波速变化的精确测量,对于监测地下应力的变化、地下结构、地球动力学、地震预报等的研究,具有重要意义.

建立由地面波速变化精确测量推演地下应力变化的关系,有利于进一步认识地球内部的动力学过程,对于探测地下结构和认识成害机理等,具有重要的意义.因此,波速变化测量精度是基础和关键.波

速变化测量与固体潮观测对应,比较波速和固体潮观测,用固体潮观测信号标定波速变化测量精度,为建立由地面波速测量推演地下应力变化打下基础^[5~7].

关于地震波速变化精确测量的研究,科学家们已进行了卓有成效的探索:

(1)1973年,Thomas等用以固定频率连续震荡的承压水柱做震源,在矿井巷道连续监测相速度变化,基线长度337m,岩石类型是大理岩,相速度的相对观测精度达 10^{-4} ,识别出了固体潮汐应力引起的波速变化^[9].

(2)1974年,Reasenber和Aki在一个花岗岩矿,利用气枪在水坑中每隔6~10s重复激发,观测原地波速的变化,基线长度200m,观测到由固体潮汐应力引起的波速变化达到0.5%,并与地表存在的非常细薄(径长比 10^{-5})的微裂隙有关,他们指出,由于细薄裂隙易于闭合,只留下刚度较大的裂隙.这种非常细薄的微裂隙应该在15m处逐渐闭合,如果想观测几公里深处固体潮引起的波速变化,需要将波速观测相对精度提高到 10^{-5} ^[10].

(3)1977年,Bungum等以水电站落水为天然连续震源,利用挪威地震台阵(Norsar)进行了超过一个星期的连续波速观测,源台距为5km~14km,用2小时记录获得了 10^{-3} 的S波波速测量精度,用1个星期的记录获得了 10^{-4} 的观测精度,波速变化呈现一个半日的周期,这表明,波速的这种变化是由于固体潮汐应力引起的^[11].

(4)1988年,Yukutake等在日本矿井巷道中,用超声波监测走时的变化,基线长度11m,共8天每隔90分钟进行连续观测,观测到了不同周期的走时变化(最高波速变化达0.3%),并与地球潮汐应力、大气压力和降雨有关^[12].

(5)2001年,Furumoto等用重复爆炸震源连续监测日本Kanto-Tokai地区P波速度随时间的变化,观测到的波速年相对变化量达到 10^{-3} /年,他们指出这种波速的变化是由于潮汐应力和长期的应力积累引起的,认为高精度地震波速观测可以监测地壳应力积累的情况^[13].

(6)2003年,Yamamura和2004年,Niu等人用压电陶瓷换能器测量了两地之间岩石超声波速变化,发现原地(in-situ)超声波速的变化能反应由固体潮汐应力、大气压变化所引起的现场应力的微弱变化^[14].

(7)2004年,Niu等用压电陶瓷换能器,对距离

3. 17m, 深度 17m 的两口井进行井间地震波速精确测定, 换能器频率为 10kHz, 经过了总长 160 小时的观测, 观测到的波速相对变化为 10^{-3} , 相对观测精

度为 3×10^{-6} , 观测到的波速应力敏感性为 $10^{-6}/\text{Pa}^{[14]}$.

表 1 波速变化精确测量的研究情况

Table 1 Instance about precise measurement of seismic velocity variation

研究者	震源	观测时间	观测时间间隔	基线长度	精度	波速变化	波速-应力 敏感性(/pa)	潮汐/大气压力
De Fazio et al (1793)	水力 振荡器	40hrs	20sec	300m	1.0E-04	1.0E-03	1.0E-06	半日
Reasenber and Aki(1974)	气枪	68hrs	50min	200m	1.0E-03	5.0E-03	2.0E-06	半日
Leary et al (1979)	气枪	3moneths	2-4hrs	120~8500m	1.0E-03	1.0E-03	-----	日潮半日
Yukutake et al (1988)	压电	8days	90min	11m	2.0E-03	3.0E-03	1.0E-07	半日
Sano et al (1999)	压电	6yrs	30min	15m	1.0E-06	3.0E-06	5.0E-09	半日
Yamamura et al (2003)	压电	1yr	30min	12m	1.0E-04	3.0E-03	5.0E-07	O1, K1, M2, S2, M3, M4
Sano(p. c.)	压电	6weeks	1hr	10m	1.0E-06	4.0E-05	1.4E-08	BP
Niu(p. c.)	压电	160hrs	1hr	3m	3.0E-06	1.0E-03	1.0E-06	M2, P1/BP

据 Yamamura, 2003 和 Niu, 2004(个人通讯)

表 1 是 Yamamura(2003) 和 Niu(2004) 总结的波速变化精确观测的研究情况. 从以上分析可以看出, 在波速变化观测方面, 许多学者已经进行了很长时间的探索, 取得了重要的进展. 我们也将进行野外试验研究, 进行地震波速度变化的精确测量.

2 地震波速度变化精确测量的应用

地震波速度变化的精确测量在地震物理预报、监测地下应力变化、研究应力和波速变化的对应关系等方面都具有重要的应用^[15~24].

2.1 地震物理预报

人们从一开始就认为, 地震波速度的变化不仅对地震预报是一个重要的长期前兆现象, 而且也可能成为了解地震发生机制的重要资料. 1973 年, 提出了重视岩石实验引起的地震波速度变化和天然地震得到的地震波速度变化(V_p/V_s 变化)的地震预报模式, 它以能统一说明地震前兆现象而崭露头角. 因此, 对地震波速度变化的这种研究, 对于地震的长期预报以及研究地震发生机制, 可以说是必不可少的.

2.2 监测地下应力的变化

地球科学是一门观测科学, 通常, 基于对地表观测(GPS, InSAR 等)得到的大地形变资料, 利用假定的结构和流变模型计算地球深部应力和应变状

态, 开展地球动力学研究, 这种由地表观测获得的深部信息具有间接和推测的性质. 直接观测地球应力场及其随时间的变化成为固体地球科学长期以来的目标. 例如, 地球应力随时间的变化是理解地震发生机理, 进行地震预报的最重要的物理依据之一, 地震孕育将伴随着孕震区微观破裂过程的产生和发展, 并造成地震波速以及波速比的变化. 通过监测这种变化, 为地震预报提供了一个可能的途径.

2.3 研究应力和波速变化的对应关系

地壳中地震波速的应力敏感性的物理基础是裂隙的出现. 一方面, 它们对地震波速产生影响, 另一方面, 是它们对环境应力场的敏感性, 这就意味着地震波速和裂隙的出现一样通常是与应力相依存的. 我们希望利用包括固体潮和大气压力在内的应力变化去校准地震波速变化的应力敏感性. 用地震学的方法直接约束地下介质形变场, 其中一个潜在的有效方法就是根据应力、应变和地震速度场的依存关系, 来得到地下介质情况.

2.4 研究近地表因素对波速变化的影响

在地震波速度精确测量的基础上, 能有效区分内部应力和地表因素等各种原因引起的变化, 如大气压力变化、降水、温度变化(冬季和夏季地表介质的弹性特性可能有较大变化), 可能的车辆行驶, 以

及观测尺度的影响等。

2.5 检测地下介质的变化,制作地下四维动态监测图

震源和地球介质是地震学研究中的两项基本内容.对地球介质的研究,主要是给出介质的地震波速度结构,然后由此延伸,给出弹性参数和其它物理量的分布.确定地球介质的地震波速度结构及各种介质参数是地球物理学的重要课题之一,不仅地震的发生,而且油、气和矿床的蕴藏都与岩石层的结构演化史有关,有关地球外层的组成和起源、板块的构造及地球动力学研究,这些信息也是必不可少的。

未来可以想象,通过长期观测得到地下介质随时间变化,从而监测地下介质的活动情况.就像天气预报的“天气云图”一样,让“地下云图”成为人们生活中每天必看的生活资讯,将是地球物理学的又一变革。

3 利用相关检测原理进行地震波速变化的测量

3.1 相关检测原理利用概述

相关检测是十九世纪四十年代发展起来的一门技术,它建立在信息论和随机过程的理论上.这一技术首先应用于军事上的雷达技术,然后逐渐转移到科学研究和民用上.现在已经在各个领域内得到日益广泛的应用.如机械震动波的频谱特性分析、弱电信息的噪声过滤、测定地震的波形和波速、生物电的测定等等^[25~27]。

相关检测原理的一个重要应用方面就是测量地震波速的变化.在波速测试的分析工作中,决定波速测量精度的关键在于记录波形的辨别及判断波到达的初动时刻是否准确.由于实际测量中,存在着各种干扰因素和干扰波及能量衰减等,这些因素都使地震波的初动时刻难以确定.目前利用波形分析和判定初动到时的波速测定分析方法不仅取决于测试技术,而且还与分析人员的经验密切相关,人为因素很大.利用互相关函数来判别初动时刻、计算走时的方法,能很好地减少各种干扰因素的影响,简单实用,快速而准确性高,也减少了人为因素的影响。

3.2 相关检测原理

如果 $x(t)$, $y(t)$ 是能量有限信号,它们的相关函数可定义为:

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) y^*(t-\tau) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} y^*(t) x(t+\tau) dt, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} R_{yx}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} y(t) x^*(t-\tau) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t) y(t+\tau) dt, \end{aligned} \quad (2)$$

式中“*”表示复共轭。

显然,相关函数是两信号之间时延为 τ 的函数.若 $x(t)$ 与 $y(t)$ 不是同一信号,则它们的相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 或 $R_{yx}(\tau)$ 称为互相关函数.如果 $x(t)$ 与 $y(t)$ 是同一信号,即 $y(t) = x(t)$,此时,它们的相关函数 $R_{xx}(\tau)$ (或简写作 $R(\tau)$) 称为自相关函数.即:

$$\begin{aligned} R(\tau) = R_{xx}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) x^*(t-\tau) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t) x(t+\tau) dt. \end{aligned} \quad (3)$$

在实际应用中,信号 $x(t)$, $y(t)$ 一般是实函数而不是虚函数,上述各式仍然适用。

在 $[-\infty, +\infty]$ 的区间里,功率函数是不可积的.通常把这类信号的相关函数定义为:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) y^*(t-\tau) dt, \quad (4)$$

$$R_{yx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} y(t) x^*(t-\tau) dt, \quad (5)$$

及

$$R(\tau) = R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) x^*(t-\tau) dt. \quad (6)$$

相关检测技术是应用信号周期性和噪声随机性的特点,通过自相关或互相关运算,达到去除噪声的一种技术.相关函数可用式(1)~(6)计算. $R_{xx}(\tau)$ 是自相关函数, $R_{xy}(\tau)$ 是互相关函数, τ 是所研究两点间的时间间隔,即两信号的时延。

利用相关性,计算两个记录信号的互相关函数,便可以较准确地求得两个记录信号的时差,从而求得速度分布.这是由于拾震器的信号是由震源信号激振所引起的,源信号在传播过程中,由于路径等因素的影响,虽然会叠加许多干扰噪声,但由于这种噪声通常不与源信号同频,即源信号与这些干扰波的信号的互相关函数很小,因而将源信号与拾震器信号进行互相关计算时,与源同频的激振信号便可以识别出来,从而得到其从源到拾震器之间的传播时间^[28~30]。

观测地震波速的细微变化,并大幅度提高地震波速的观测精度,是地震科学的一个难题.利用相关检测的原理,能有效排除干扰和不确定因素,提高波

速观测精度,将野外现场波速观测精度提高到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$,并且用同期固体潮观测信号标定检验波速变化测量精度,利用这种处理方法能很好地解决识别到时这一波速测量中的难题.

3.3 脉冲序列相关检测

传统的地震勘探方法,都是一次震源激发,视为一次单一事件,在接收端进行相应的触发接收.提高信噪比的传统处理办法是加大震源能量或多道(多台)信号叠加,但震源能量提高 n 倍或 n 道(n 台)信号叠加,最多只能提高信噪比 \sqrt{n} 倍.但是,由于衰减和频散的存在,随着距离的增加,人工震源激发的脉冲信号变得非常微弱,就无法进行远距离,大深度的探测.这有些类似于第一代雷达的工作方式,通过发射和接收单个电磁波脉冲来确定探测目标,要增强捕获能力则要通过加大能量甚至动用整个电厂.而现在的雷达系统,就是利用“脉冲序列相关”原理,解决了小能量、微弱信号提取的等难题.因此,必须引入新的方法和理论,解决用小能量人工震源进行远距离大深度探测的问题.

将脉冲序列和相关技术相结合,引入地震勘探,将多次小能量的随机编码激发序列,等效为一次大能量的激发,加强人工震源的探测能力,提高人工震源激发的弹性波的可检测性,将是一项十分有发展前景的地震探测新技术.

由人工震源向地下发送随机的脉冲序列,利用精确记录的源函数与地震记录相关分析获取地下信息的脉冲序列相关检测技术,其基本原理如下:

令 $s = [s(i), i = 1, 2, \dots, N]$ 为 N 个激发源信号组成的随机脉冲序列, $s(i)$ 为第 i 次激发信号,地震波从源点传播到接收台的响应函数为 h ,则仪器记录 y 可以表示为

$$y = h \times s + n,$$

其中 n 为相应的噪声 $n = [n(i), i = 1, 2, \dots, N]$.

由于不同时刻 h 近似相等,因此上式可以写成

$$y = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(1) \\ s(2) \\ \vdots \\ s(N) \end{bmatrix} \times h + \begin{bmatrix} n(1) \\ n(2) \\ \vdots \\ n(N) \end{bmatrix},$$

用源函数 s 与接收台记录 y 做互相关,有

$$[s(1), s(2), \dots, s(N)] \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix}$$

$$= [s(1), s(2), \dots, s(N)] \begin{bmatrix} s(1) \\ s(2) \\ \vdots \\ s(N) \end{bmatrix} \times h + [s(1), s(2), \dots, s(N)] \begin{bmatrix} n(1) \\ n(2) \\ \vdots \\ n(N) \end{bmatrix}.$$

此时互相关系数比较大,因为信号序列具有良好的自相关性,上式右边第一项中 $[s(1), s(2), \dots, s(N)][s(1), s(2), \dots, s(N)]^T$ 是一个相对较大的常数,第一项将是一个幅值较大的 h 的函数.而信号序列与噪声的相关性比较差,在理想条件下,第二项 $[s(1), s(2), \dots, s(N)][n(1), n(2), \dots, n(N)]^T$ 的值将为趋于零的小量,所以,可以利用源函数与接收台站记录的脉冲序列的互相关函数峰值来检测信号^[31],得到信号的准确时延,这将有效提高人工震源的探测能力.

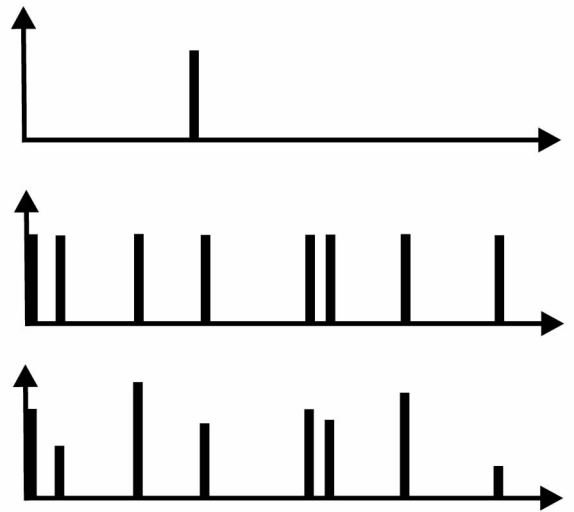


图1 人工震源脉冲序列示意图:将多次激发脉冲序列代替传统的单次激发,序列中的多次激发,可以是等能量的重复震源的随机脉冲序列,也可以是不等能量的震源的随机脉冲序列.

Fig. 1 Pulses sequence excited from active seismic source: We use pulses sequence instead of traditional signal excitation. The signal pulse in the sequence can be the same energy repeat excitation as well as the different energy random excitation.

4 结 论

地震学科的关键科学问题,在其学科范围内有时候很难解决,但是借助另一学科的概念、理论和方法——相关检测法,形成新的技术和方法,能有效解决问题.相关检测技术能大幅度提高人工震源主动

探测的探测距离,获得高精度的地震波速度变化数据,相对测量精度能达到 $1.00E-05$ 的量级,并能在小、中、大尺度野外实验中运用.相关检测技术包括的单一脉冲检测和脉冲序列相关检测,其中脉冲序列相关检测是一种新的尝试和探索.

表 2 研究参数对比

Table 2 Contrast of researchful parameters

研究者	De Fazio (1793)	Reasenbergl, Aki(1974)	Leary (1979)	Yukutake (1988)	Sano (1999)	Yamamura (2003)	CRG 研究
源	可控震源	气枪	气枪	压电陶瓷	压电陶瓷	压电陶瓷	电落锤
持续时间	40 小时	68 小时	3 个月	8 天	6 年	1 年	1 个月
观测时间间隔	20 秒	50 分钟	2—4 小时	90 分钟	30 分钟	30 分钟	1—12 小时
基线长度(m)	300	200	120—8500	11	15	12	14—248
观测精度	$1.00E-04$	$1.00E-03$	$1.00E-03$	$2.00E-04$	$1.00E-06$	$1.00E-04$	$1.00E-05$
速度变化	$1.00E-03$	$5.00E-03$	$1.00E-03$	$1.00E-03$	$3.00E-06$	$3.00E-03$	$1.00E-05$
波速对应力的敏感性	$1.00E-06$	$2.00E-06$	$1.00E-07$	————	$5.00E-09$	$5.00E-07$	————
所检测到的潮汐分量	半日	半日	日波,半日	半日	半日	O1, K1, M2, S2, M3, M4	M1, M2, O1

在 2004 年 12 月~2006 年 12 月,中国地震局、中国地震局地球物理研究所、中国地震局地震预测研究所、中国地震局郑州物探中心、北京市地震局等多家单位联合,进行了多次人工震源野外试验.其中 2006 年 4 月—5 月,我们联合云南省地震局,在昆明利用电落锤人工震源,进行了一次为期 30 天的连续观测实验,将我们的实验的情况与国际上其它的实验情况进行对比(表 2),详细结果见“编码震源提高地震探测能力的野外试验研究^[31]”和“由地表观测精确测定地震波速度的连续变化^[32]”等文献.用相关检测法进行地震波速度变化的精确测量,是一种新方法的尝试,并且已经取得了充满希望的结果,为以后的进一步研究和运用打下了坚实的基础.进一步的研究正在进行中.

致 谢 此项工作,得到了中国地震局、中国地震局地震预测研究所、中国地震局地球物理研究所、北京市地震局、云南省地震局的同志的大力支持,在此感谢陈棋福、林建民、杨微、徐平、王彬、阙云彩、杜爱民.

参 考 文 献 (References):

[1] 章文波,李沙白.弹性波速测试分析方法的研究[A].强震观测研究报告集[C].北京:专利文献出版社,1996.

- [2] 唐晓明.岩石中波速的精确测量[M].北京:中国地震局,1984.
- [3] 古本宗充,平松良浩,佐藤隆司.地震波速变化和地壳内部应力的测定[J].世界地震译丛,2005,2005(2):28~35.
- [4] Hazzard J F, Young R P. 导致脆性岩石破裂和地震波速变化的数值研究[J].世界地震译丛,2004,2004(6):12~16.
- [5] 罗桂纯,王宝善,葛洪魁,陈颀.气枪震源在地球深部结构探测中的应用研究进展[J].地球物理学进展,2006,21(2):400~407.
- [6] Nersesov I L, Semonova A N, Simbireva I G. Space-time distribution of the travel-time ratios of transverse and longitudinal wave in the Garm area[J]. In: The physical basis of foreshocks, Nauka, Moscow, 1969.
- [7] Aggarwal Y P, Sykes L R, Armbruster J, Sbar M L. Premonitory changes in seismic velocities and prediction of earthquakes[J]. Nature, 1973,241(1):12.
- [8] Nur A. Dilatancy, pore fluids, and premonitory variation of ts/tp travel times[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1972, 62(5):1217~1222.
- [9] Thomas L, Fazio D, Aki K, Alba J. Solid earth tide and observed change in the in-situ seismic velocity[J]. Journal of Geophysical Research, 1973,78(8):1319~1322.
- [10] Reasenbergl, Aki K. A precise, continuous measurement of seismic velocity for monitoring in situ stress[J]. JGR, 1974, 79:399~406.
- [11] Bungum H, Risbo T, Hjorenberg E. Precise continuous monitoring of seismic velocity variations and their possibility connection to solid tides[J]. Journal of Geophysical Research, 1977,82(33): 5365~5373.

- [12] Yukutake H, Nakajima T, Doi K. In situ measurements of elastic wave velocity in a mine, and the effects of water and stress on their variation[J]. *Tectonophysics*, 1988, 149:165~175.
- [13] Furumoto M, Yuko Ichimori, Nobunhiko Hayashi. Seismic wave velocity changes and stress build-up in the crust of the Kanto-Tokai region[J]. *Geophysical Research Letter*, 2001, 28(19):3737~3740.
- [14] Yamamura K, Sano O, Utada H. Long-term observation of in situ seismic velocity and attenuation [J]. B6, ESE5-1, 2317, doi:10.1029/2002JB002005.
- [15] Lu G X, Wei C S, Guo T. Effects of tectonic force on hydrostatic pressure in crust. *Journal of China University of Geosciences*[J]. 2004, 15(2):155~161.
- [16] Lu G X, Ma R, Liu R X, Wang F Z, Guo C S. Experimental study of confining pressure initiated by tectonic force [J]. *Journal of China University of Geosciences*. 2004, 15(2):162~166.
- [17] 赖院根, 刘启元, 陈九辉, 刘洁, 李顺成, 郭颀, 黄志斌. 首都圈地区横波分裂与地壳应力场特征[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 189~196.
Lai Y Y, Liu Q Y, Chen J H, Liu J, Li S C, Guo B, Huang Z B. Shear wave splitting and the features of the crustal stress field in the Capital Circle[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(1): 189~196.
- [18] 郑勇, 傅容珊, 熊熊. 中国大陆及周边地区现代岩石圈演化动力学模拟[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(2): 415~427.
Zheng Y, Fu R S, Xiong X. Dynamic simulation of lithospheric evolution from the modern China mainland and its surrounding areas [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(2): 415~427.
- [19] 杨文采, 杨午阳, 程振炎. 中国大陆科学钻探孔区的地震波速模型[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(2): 477~489.
Yang W C, Yang W Y, Cheng Z Y. Seismic velocity model of the Chinese continental scientific drilling site[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(2): 477~489.
- [20] 齐诚, 赵大鹏, 陈颀, 陈棋福, 王宝善. 首都圈地区地壳 P 波和 S 波三维速度结构及其与大地震的关系[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(3): 805~815.
Qi C, Zhao D P, Chen Y, Chen Q F, Wang B S. 3-D P and S wave velocity structures and their relationship to strong earthquakes in the Chinese capital region [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(3): 805~815.
- [21] 王大兴, 辛可锋, 李幼铭, 高静怀, 伍向阳. 地层条件下砂岩含水饱和度对波速及衰减影响的实验研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(3): 908~914.
Wang D X, Xin K F, Li Y M, Gao J H, Wu X Y. An experimental study of influence of water saturation on velocity and attenuation in sandstone under stratum conditions[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(3): 908~914.
- [22] 胥颐, 刘建华, 郝天珢, 刘劲松, 李志伟. 中国东部海域及邻区岩石层地幔的 P 波速度结构与构造分析[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1053~1061.
Xu Y, Liu J H, Hao T Y, Liu J S, Li Z W. P wave velocity structure and tectonics analysis of lithospheric mantle in eastern China seas and adjacent regions[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(4): 1053~1061.
- [23] 张学民, 刁桂苓, 赵英萍, 王卫民, 束沛镛. 华北地区深部地幔剪切波速度结构研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1709~1719.
Zhang X M, Diao G L, Zhao Y P, Wang W M, Shu P Y. Study on mantle shear wave velocity structures in North China[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(6): 1709~1719.
- [24] 嘉世旭, 齐诚, 王夫运, 陈棋福, 张先康, 陈颀. 首都圈地壳网格化三维结构[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(6): 1316~1324.
Jia S X, Qi C, Wang F Y, Chen Q F, Zhang X K, Chen Y. Three-dimensional crustal gridded structure of the Capital area[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(6): 1316~1324.
- [25] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [26] 陈永强. 水下目标谱相关检测和运动参数估计的研究[A]. 中国科学院声学研究所, 2003.
- [27] 管军. 基于相关检测原理的电磁流量计的研究[D]. 浙江大学, 硕士论文.
- [28] Takeshi N, Satoru T, Teruo Y. Temporal changes in seismic velocity of the crust around Iwate volcano, Japan, as inferred from analyses of repeated active seismic experiment data from 1998 to 2003[J]. *Earth Planets Space*, 2005, 57: 491~505.
- [29] Clifford G. Coherence and time delay estimation[J]. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 1987, 75(2):236~255.
- [30] Azizul H Q. An Overview on the time delay estimate in active and passive systems for target localization [J]. *IEEE TRANSACTIONS ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING*, 1981, ASSP-29(3): 527~533.
- [31] 葛洪魁, 林建民, 王宝善, 宋丽莉, 罗桂纯, 陈颀. 编码震源提高地震探测能力的野外实验研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(3): 864~870.
- [32] 王彬, 朱平, 罗桂纯, 王宝善. 由地表观测精确测定地震波速的连续变化[J]. *科学通报*(待刊).