

刘必灯, 李小军, 周正华, 刘培玄, 王玉石. 2011. 气枪震源地震动效应分析. 地震学报, 33(4): 539-544.
Liu Bideng, Li Xiaojun, Zhou Zhenghua, Liu Peixuan, Wang Yushi. 2011. Ground motion effect analysis of airgun source. *Acta Seismologica Sinica*, 33(4): 539-544.

气枪震源地震动效应分析^{*}

刘必灯^{1,2),*} 李小军³⁾ 周正华²⁾ 刘培玄²⁾ 王玉石³⁾

1) 中国河北三河市燕郊 065201 防灾科技学院

2) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

3) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

关键词 气枪震源 地震动效应 信噪比 优势频率

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.04.013 中图分类号: P315.3 文献标识码: A

Ground motion effect analysis of airgun source

Liu Bideng^{1,2),*} Li Xiaojun³⁾ Zhou Zhenghua²⁾ Liu Peixuan²⁾ Wang Yushi³⁾

1) *Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Yanjiao, Sanhe City, Hebei Province 065201, China*

2) *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China*

3) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

Key words: airgun source; ground motion effect; signal-to-noise ratio; predominant frequency

迄今为止, 人类关于地球内部结构、组成和演化的知识仍主要来源于人们从天然地震引起的地震波中获取的信息。尽管天然地震能量大、探测范围广, 但其发生的频率低、位置不确定、定位精度差, 因此利用天然地震探测地球内部精度相当低。与天然地震相比, 人工震源的位置及激发时间可以精确控制且重复性好, 因此具有很高的探测精度。但常用的人工震源(如爆破震源、电火花震源、锤击震源及列车震源)激发的能量均无法与天然地震相提并论, 且探测距离十分有限。尽管炸药爆破可以通过增加药量来增大探测的深度和距离, 但其重复性较差使得后期数据处理难度加大, 且价格昂贵、对环境影响大, 因而应用上受到了较大的限制(陈颙等, 2007a, b)。因此, 新型人工震源的理论和方法的研究引起了国内外许多学者的关注(丘学林等, 2007)。实验研究表明, 在现有的多种震源中, 气枪震源是满足深部探测低频、大能量、高效、重复性好、绿色环保等要求的良好震源(陈颙等, 2007a, b), 且具有高分辨率(陈颙等, 2007a, b)、高精度(罗桂纯等, 2006)、震源激发时间和地点均可控等特点。因此, 气枪震源可为科学探测台阵系统提供高能量、低频、重复性好、性能可靠的可控人工震源系统(陈颙等, 2007a, b; 周宝华, 刘威北, 1998a, b; Dragoset, 2000)。目前气枪震源在区域尺度的深部地球物理探测中得到了迅速推广和广泛应用, 如美国的 LARSE 实验(Brocher *et al*, 1995, 1997; Fisher *et al*, 2003; Fuis *et al*, 2003; Godfrey *et al*, 2001; Okaya *et al*, 1996a, b, 2003; Woods, 1995; Lutter *et al*, 1999)和新西兰的 SIGHT 计划(Stern *et al*, 2002; Okaya *et al*, 2002), 以及国内的南海东北部海陆联合勘探计划(丘学林等, 2003; 赵明辉等, 2004)和华北地震台阵探测计划(陈颙等, 2006, 2007a, b; 罗桂纯等, 2006)。

2006年6—11月由陈颙院士组织, 在河北省遵化市上关湖水库开展了大规模气枪可控震源水库实验。实验的主要目的是尝试大容量气枪震源在深部探测和地震预报中应用的可行性, 实验水库中大容量

* 基金项目 中国工程院重大咨询专项(2010-ZD-4)、科技部重点公益项目(2005DIA3J117)和地震行业科研专项(200808019)资助。

收稿日期 2010-08-29 收到初稿, 2011-03-30 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: geoscience@yahoo.cn

气枪定点激发地震信号的传播距离，并通过对气枪震源的实验，为探索华北克拉通的结构、状态和演化提供技术平台。与此同时，进行了近震源区强震动观测。本文基于此次实验所得的强震动记录进行了气枪震源地震动的频谱特征和衰减规律分析，以研究气枪震源激发的地震动特征。

1 气枪震源实验

此次气枪可控震源水库实验选择在实验条件较好的河北省遵化市上关湖水库(40.22°N , 117.72°E)进行。该水库为中等容量水库(库容 $3.6 \times 10^7 \text{ m}^3$)，具有物资供应方便、生活便利等条件。为在水库中开展气枪激发实验，实验组设计加工了大容量气瓶组、气源控制系统、电路控制系统，并搭建了气枪激发平台和设备平台，配备了吊枪装置，租赁了大容量、高压空气压缩机等关键设备。激发地点水深 18 m，气枪沉放深度 9 m，激发实验采用 4 个气枪、编码激发。实验中就不同激发条件进行了激发实验，共计 500 多次，激发时间间隔约 2 分钟(陈颤等, 2007a, b)。

在气枪震源地震动效应监测中，共布设了 6 个测点，沿一条以震源为中心的放射线布设，如图 1 所示。为了突出气枪震源地震动衰减特征的监测，在近震源处测点稍密，且随震源距增大测点间距加大。

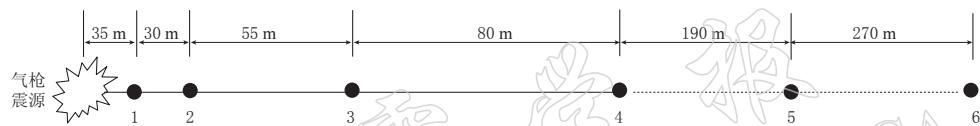


图 1 地震动效应监测点布设示意图

Fig. 1 Layout of ground motion observation points

监测使用的仪器为美国 Kinematics 公司生产的 Etna 型数字强震仪，其主要技术指标见表 1 和表 2。测试仪器观测方位及对应的线道分别为，X 向为东西向 1 道，Y 向为南北向 2 道，Z 向为竖向 3 道。

表 1 Etna 型数字强震仪传感器主要技术指标

Table 1 Key technical indexes of the Etna sensor

序号	项目	技术指标
1	类型	力平衡式加速度计 (内置)
2	动态范围	$>145 \text{ dB}$
3	满量程	$\pm 2g$
4	频率范围	DC—200 Hz
5	线性度	$<1000 \mu\text{g}/\text{g}^2$
6	横向灵敏度比	$<0.1\%$
7	运行环境温度	(-20—+70) °C

注：表中 g 为重力加速度， $1g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。

表 2 Etna 型数字强震仪记录器主要技术指标

Table 2 Key technical indexes of the Etna digital recorder

序号	项目	技术指标
1	类型	过采样“Delta-Sigma”型 24 位 DSP
2	通道数	3
3	输入	$\pm 2.5 \text{ V}$
4	动态范围	$108 \text{ dB} @ 200 \text{ sps}$
5	频响	$DC-80 \text{ Hz} @ 200 \text{ sps}$
6	分辨率	18 位分辨率@ 200 sps
7	噪声	$<8 \mu\text{V RMS}$
8	采样率	100 sps, 200 sps, 250 sps
9	道间干扰	无
10	触发方式	连续、阈值
11	GPS 校时精度	5 ms

2 气枪震源地震动效应

在气枪震源激震试验中，共获取了 100 多组三分量加速度记录。所获取记录经基线校正等常规处理后，对其进行了傅里叶变换等分析。图 2 为同一次激发 6 个测点所获取的加速度时程。由图 2 可看出，该记录波形完整，震相清楚，且震动持时不足 2 s。

图 2 是同一次气枪震源爆破试验在 6 个观测场点获取的地震动加速度时程，对应的傅里叶振幅谱分别示于图 3。从图可以看出，气枪震源激震地震动频率在 80 Hz 以上的信号衰减很快，在很短的距离范围内，信号就衰减至接近环境振动的水平。从各测点的比较结果可以看出，在 1—80 Hz 频带内，除测点 2 相对于测点 1 和测点 6 相对于测点 5 由于衰减，信号相差明显以外，测点 3、测点 4 和测点 5 的信号基本接近，衰减不明显。其主要差别在于在某些频率点上出现峰值，局部峰值产生原因可能是局部场地条件

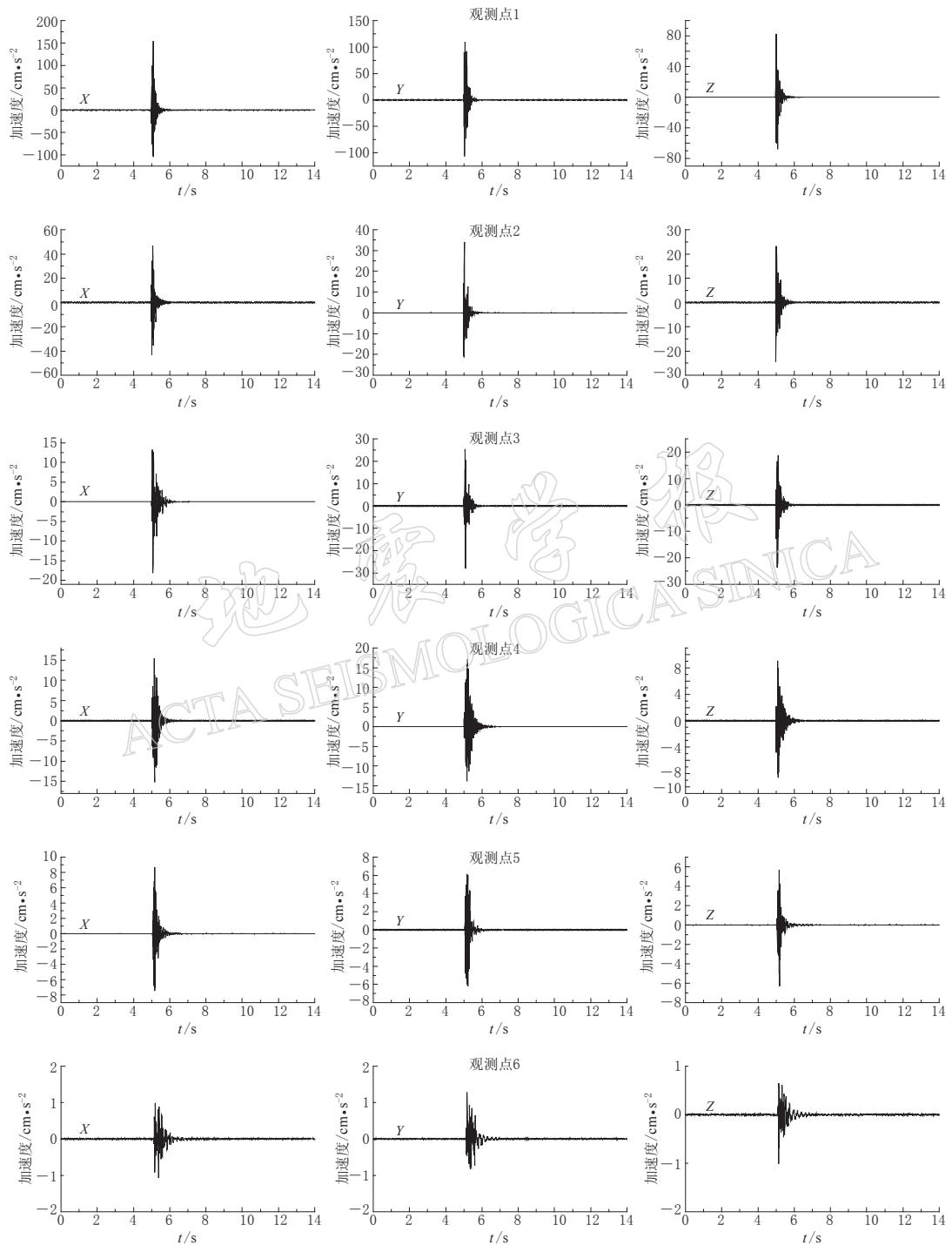
图 2 气枪激震试验典型加速度时程(X 、 Y 、 Z 分别表示东西向、南北向和竖向)

Fig. 2 Typical acceleration time history of airgun excited experiments

影响所致。尤其在 1—8 Hz 频带内, 无论是水平向还是竖向地震动, 测点 1—6 的信号几乎相等。相对于其它测点, 测点 6 地震动信号经衰减, 在 40 Hz 以上, 信号很弱, 基本接近环境振动水平。图 4 所示的测

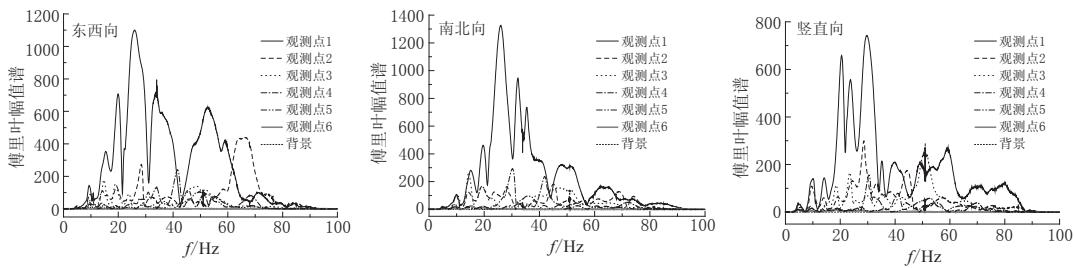


图 3 气枪激震试验典型加速度傅里叶谱

Fig. 3 Comparison of typical Fourier spectra components produced by airgun excited experiments

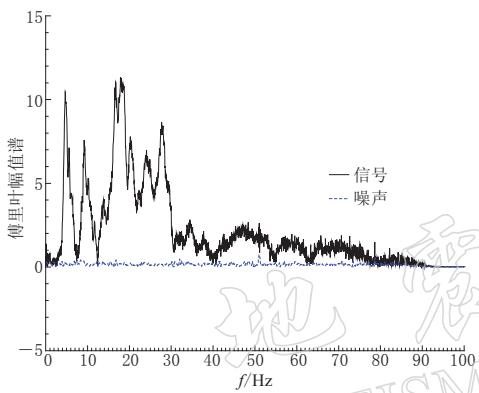


图 4 测点 6 激震地震动与环境振动傅里叶谱对比

Fig. 4 Comparison of Fourier spectra produced by airgun source and background vibration at observation point 6

点 6 信噪比结果给予了进一步的证明, 但同时可以看出, 在 1—40 Hz 频带内, 仍有较高的信噪比。

图 5 示出了 43 次气枪震源爆破试验各观测点的东西向、南北向和竖向地震动峰值加速度衰减曲线。由图 5 可以看出, 不管是水平向地震动, 还是竖向地震动, 当震中距在 65 m 范围内, 地震动衰减很快, 如东西向、南北向、竖向地震动峰值均值分别由 $166.5, 113.8 \text{ cm/s}^2$ 和 87.1 cm/s^2 衰减到 $44.3, 35.2 \text{ cm/s}^2$ 和 24.1 cm/s^2 。随着震中距增加, 地震动衰减速度变得相对较慢。当震中距超过 200 m, 每百米水平向约衰减 0.04 cm/s^2 , 竖向约衰减 0.02 cm/s^2 。这表明震中距大于 200 m 竖向地震动比水平向地震动衰减慢。这一特征有别于天然地震的地震动特征。同时, 从图 5 中亦可以看出, 当震中距在 65—200 m 范围内时, 南北向和竖向地震动衰减特征与东西向地震动衰减特征不同, 在 65—120 m 范围内

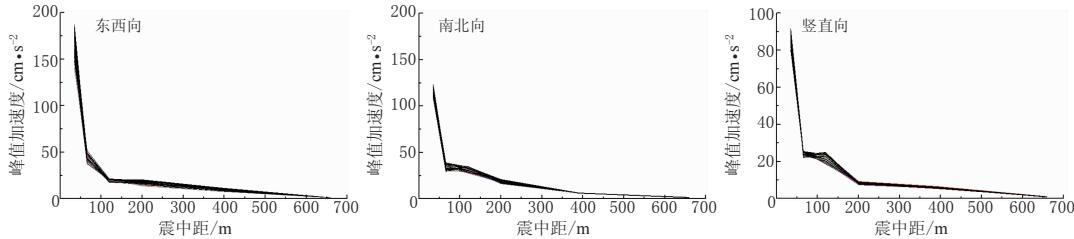


图 5 地震动峰值衰减曲线

Fig. 5 Attenuation curves of peak ground acceleration

南北向和竖向地震动几乎没有衰减。分析其原因, 可能是由地形影响所致。

图 6 给出了相邻两次气枪激震试验观测点 1 的加速度时程。从图中可以看出, 两次激震地震动的波形完全相同, 经叠加能完全重合, 这表明气枪震源具有很好的重复性。

气枪震源附近测点 1 的激震地震动与环境振动傅里叶谱对比结果如图 7 所示。结合图 3 中各观测点激震地震动与环境振动傅里叶谱对比结果可以看出, 气枪震源激震地震动具有很宽的频带, 在 1—80 Hz 频率范围内具有很高的信噪比。从图 7 中可以看出, 观测点 1 的水平向和竖向优势频率分别约为 25 Hz 和 30 Hz。与爆破地震动相比, 气枪震源激震地震动具有频带宽、优势频率低、低频地震动成分较丰富等特点。

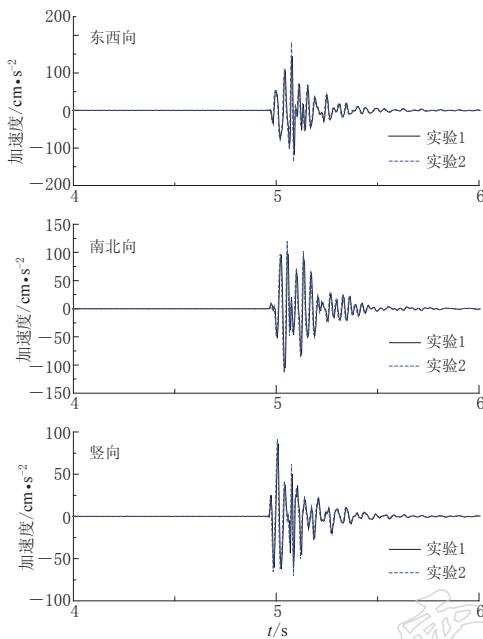


图 6 测点 1 两次气枪激震试验加速度时程
Fig. 6 Acceleration time history of two successive experiments at observation point 1

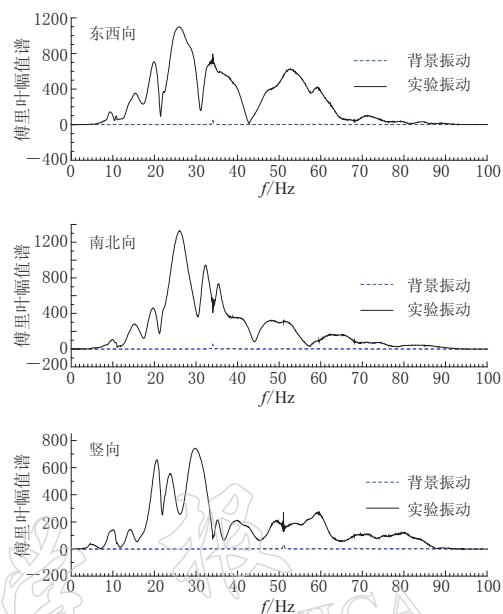


图 7 测点 1 激震地震动与环境振动傅里叶谱对比
Fig. 7 Comparison of Fourier spectra produced by airgun source and background vibration at observation point 1

3 结论

气枪震源引起的地震动分析结果表明, 气枪震源激震地震动波形完整, 且持时短, 不足 2 s; 气枪震源具有很好的重复性; 气枪震源附近测点 1 在 1—80 Hz 频带内, 激震地震动具有很高的信噪比, 优势频率水平向和竖向分别约为 25 Hz 和 30 Hz; 震源附近地震动衰减很快, 当震中距超过 50 m 后, 衰减相对变慢; 气枪震源激震地震动高频成分随震中距增加衰减很快, 当震中距超过 600 m 时, 信号经衰减 40 Hz 以上信号很弱, 基本接近背景振动水平, 但在 1—40 Hz 频带内, 信号仍有较高的信噪比.

参 考 文 献

陈颙, 周华伟, 葛洪魁. 2006. 华北地震台阵探测计划[J]. 大地测量与地球动力学, 25(4): 1-5.

陈颙, 张先康, 丘学林, 葛洪魁, 刘宝金, 王宝善. 2007a. 陆地人工激发地震波的一种新方法[J]. 科学通报, 52(11): 1317-1321.

陈颙, 王宝善, 葛洪魁, 徐平, 张尉. 2007b. 建立地震发射台的建议[J]. 地球科学进展, 22(5): 441-446.

罗桂纯, 王宝善, 葛洪魁, 陈颙. 2006. 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, 21(2): 400-407.

丘学林, 赵明辉, 叶春明, 王天楷, 王平, 张毅祥, 夏戡原, 李昭兴. 2003. 南海东北部海陆联测与海底地震仪探测[J]. 大地构造与成矿学, 27(4): 295-300.

丘学林, 陈颙, 朱日祥, 徐辉龙, 施小斌, 叶春明, 赵明辉, 夏少红. 2007. 大容量气枪震源在海陆联测中的应用: 南海北部试验结果分析[J]. 科学通报, 52(40): 463-469.

赵明辉, 丘学林, 夏戡原, 谢剑波, 叶春明. 2004. 南海东北部海陆联测地震数据处理及初步结果[J]. 热带海洋学报, 23(1): 58-63.

周宝华, 刘威北. 1998a. 气枪震源的发展与使用分析(上)[J]. 物探装备, 8(1): 1-6.

周宝华, 刘威北. 1998b. 气枪震源的发展与使用分析(下)[J]. 物探装备, **8**(2): 1-5, 9.

Brocher T M, Clayton R W, Klitgord K D, Bohannon R G, Sliter R, McRaney J K, Gardner J V, Keene J. 1995. Multi-channel seismic-reflection profiling on the R/V maurice ewing during the Los Angeles region seismic experiment (LARSE)[R]//USGS Open File Rep, 95-228. Seattle: Incorporated Research Institutions for Seismology Data Management Center: 1-14.

Brocher T M, Bilek S L, Clayton R W, Okaya D A. 1997. Stacked wide-angle recordings of air-gun signals from the 1994 Los Angeles region seismic experiment (LARSE), California[R]//USGS Open File Rep, 97-132. Seattle: Incorporated Research Institutions for Seismology Data Management Center: 3-15.

Dragoset B. 2000. Introduction to air-guns and air-gun arrays[J]. *The Leading Edge*, **9**(8): 892-897.

Fisher M A, Normark W R, Bohannon R G, Sliter R W, Calvert A J. 2003. Geology of the continental margin beneath Santamonica bay, southern California, from seismic-reflection data [J]. *Bull Seism Soc Amer*, **93**(5): 1955-1983.

Fuis G S, Clayton R W, Davis P M, Ryberg T, Lutter W J, Okaya D A, Hauksson E, Prodehl C, Murphy J M, Benthien M L, Baher S A, Kohler M D, Thygesen K, Simila G, Keller G R. 2003. Fault systems of the 1971 San Fernando and 1994 Northridge earthquakes, southern California: Relocated aftershocks and seismic images from LARSE II[J]. *Geology*, **31**(2): 171-174.

Godfrey N J, Fuis G S, Langenheim V, Okaya D A, Brocher T M. 2001. Lower crustal deformation beneath the central Transverse Ranges, southern California: Results from the Los Angeles region seismic experiment[J]. *J Geophys Res*, **107**(B7): 8-1—8-19.

Lutter W J, Fuis G S, Thurber C H, Murphy J. 1999. Tomographic images of the upper crust from the Los Angeles basin to the Mojave Desert, California: Result from the Los Angeles region seismic experiment[J]. *J Geophys Res*, **104**(B11): 25543-25565.

Okaya D A, Bhowmik J, Fuis G, Murphy J, Robertson M, Chakraborty A, Benthien M, Hafner K, Norris J. 1996a. Air-gun data acquired at onshore stations during the Los Angeles region experiment (LARSE) 1994[R]//PASSCAL Data Report, 96-019. Seattle: Incorporated Research Institutions for Seismology Data Management Center: 1-12.

Okaya D A, Bhowmik J, Fuis G, Murphy J, Robertson M, Chakraborty A, Benthien M, Hafner K, Norris J. 1996b. LARS2: Explosion data acquired at onshore stations during the Los Angeles region experiment (LARSE) 1994[R]//PASSCAL Data Report, 96-020. Seattle: Incorporated Research Institutions for Seismology Data Management Center: 1-37.

Okaya D A, Henrys S, Stern T. 2002. Double-sided onshore-offshore seismic imaging of a plate boundary: 'super-gathers' across South Island, New Zealand[J]. *Tectonophysics*, **355**(2002): 247-263.

Okaya D A, Stern T, Holbrook S, Avendonk H V, Davey F, Henrys S. 2003. Imaging a plate boundary using double-sided onshore-offshore seismic profiling[J]. *The Leading Edge*, **22**(3): 256-260.

Stern T, Okaya D A, Scherwath M. 2002. Structure and strength of a continental transform from onshore-offshore seismic profiling of South Island, New Zealand[J]. *Earth Planets Space*, **54**(11): 1011-1019.

Woods Hole. 1995. Los Angeles region seismic experiment (LARSE)-cruise report[R/OL]//USGS. [2010-08-25]. <http://woodshole.er.usgs.gov/operations/obs/larse94.html>.