DOI: 10.11883/bzycj-2017-0029 文章编号: 1001-1455(2018)05-0985-08

利用全元素矩张量反演方法识别地下核爆炸*

何永锋[1],李 锴[1],曾乐贵[1],姚国政[1],赵克常[2],张献兵[2],刘炳灿[1]
(1. 陆军装甲兵学院,北京 100072;
2. 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871)

摘要: 将震源矩张量中的各分量作为权重因子,利用基本 Green 函数的线性组合可以对地震波场进行描述,本文利用水平分层模型下的广义反射-透射系数方法的地震波场正演公式,反演了苏联东哈萨克斯坦地下核试验场的 7 次地下核爆炸、3 次震中位置相近的天然地震的震源矩张量,反演结果表明地下核爆炸震源明显含有爆炸源成分,同时包含双力偶成分(DC)和线性偶极补偿源成分(CLVD),且 CLVD 成分比重大,CLVD 的存在可用层裂机制来解释;天然地震震源矩张量的反演结果表明,DC源为主要成分,符合剪切位错震源模式。

关键词: 地下核爆炸;面波;Green 函数;全元素矩张量反演;CLVD 源
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

地下核试验通常在严格保密的条件下进行,核试验场通常为人烟稀少的偏远地区,获取地下核试验的近场观测数据十分困难,从某种客观程度上讲,利用区域少量或单台观测数据分析和识别地下核试验具有十分重要的现实意义[1-2]。

通常情况下,可以采用忽略源区中的非线性效应等效力理论模型来描述震源[3-4],可以将震源定量描述为震源的断层面解(包括走向、滑动角、倾角)[5]。利用矩张量的形式分析震源机制,可以将观测资料、震源和地震波传播路径的相互关系归结为一种线性关系,随着理论地震图计算及有效分析能力的不断提高,利用复杂分层介质理论模型的震源机制反演方法取得许多重要进展。天然地震的反演研究以 Jost 等[6]的研究成果为代表。Wang 等[1]通过进一步分析研究,得到了任意爆炸源和一个位错点源产生的地震波场表达式,以及其中包含的 10 个基本 Green 函数,其中包括爆炸源的基本 Green 函数。该地震波场表达式从理论上可以通过反演方式得到含有爆炸源成分的全矩张量解(full moment tensor)[5]。Minson 等[7]和 Dreger 等[2]对 Jost 等[6]的包含爆炸 Green 函数的地震波场公式进一步修正,得到了能够准确反演爆炸源成分的公式,该公式采用 Saikia 等[8]定义的离散波数积分方法来研究理论 Green 函数。

本文中,采用基于 Chen[9]和 Yao 等[10]的基于广义反、透射系数水平层状地球模中理论地震图的计算方法,对苏联的 7 次核爆炸及震中位置相近的天然地震进行反演,为探索核爆炸震源机制提供参考。

1 方法原理

基于面波反演震源矩张量的理论地震波场可由矩张量 $\boldsymbol{M}$ 各分量作为权重的基本 Green 函数的线性组合来表示,早期工作中用于计算理论 Green 函数的介质模型比较简单,主要考虑地球表面的边界条件。本文中,采用文献[9-10]中理论地震图的计算方法进行分析,在圆柱坐标系中,理论位移公式为[5]:

* **收稿日期**: 2017-01-20; **修回日期**: 2017-03-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(41374068)
第一作者: 何永锋(1966—),男,教授,heyfeng@sina.com。

$$
\begin{cases}
u_z = M_{xx}\left[\dfrac{G_{z,\mathrm{ss}}}{2}\cos(2\theta) - \dfrac{G_{z,\mathrm{dd}}}{3} + \dfrac{G_{z,\mathrm{ep}}}{3}\right] + M_{yy}\left[-\dfrac{G_{z,\mathrm{ss}}}{2}\cos(2\theta) - \dfrac{G_{z,\mathrm{dd}}}{3} + \dfrac{G_{z,\mathrm{ep}}}{3}\right] + \\
\quad M_{zz}\left[\dfrac{2}{3}G_{z,\mathrm{dd}} + \dfrac{G_{z,\mathrm{ep}}}{3}\right] + M_{xy}[G_{z,\mathrm{ss}}\sin(2\theta)] + M_{xz}[-G_{z,\mathrm{ds}}\cos\theta] + M_{yz}[-G_{z,\mathrm{ds}}\sin\theta] \\
u_r = M_{xx}\left[\dfrac{G_{r,\mathrm{ss}}}{2}\cos(2\theta) - \dfrac{G_{r,\mathrm{dd}}}{3} + \dfrac{G_{r,\mathrm{ep}}}{3}\right] + M_{yy}\left[-\dfrac{G_{r,\mathrm{ss}}}{2}\cos(2\theta) - \dfrac{G_{r,\mathrm{dd}}}{3} + \dfrac{G_{r,\mathrm{ep}}}{3}\right] + \\
\quad M_{zz}\left[\dfrac{2}{3}G_{r,\mathrm{dd}} + \dfrac{G_{r,\mathrm{ep}}}{3}\right] + M_{xy}[G_{r,\mathrm{ss}}\sin(2\theta)] + M_{xz}[-G_{r,\mathrm{ds}}\cos\theta] + M_{yz}[-G_{r,\mathrm{ds}}\sin\theta \\
u_{\mathrm{t}} = M_{xx}\left[\dfrac{G_{\mathrm{t,ss}}}{2}sin(2\theta)\right] + M_{yy}\left[-\dfrac{G_{\mathrm{t,ss}}}{2}sin(2\theta)\right] + M_{xy}[-G_{\mathrm{t,ss}}\cos(2\theta)] + \\
\quad M_{xz}[G_{\mathrm{t,ds}}\sin\theta] + M_{yz}[-G_{\mathrm{t,ds}}\cos\theta]
\end{cases} \tag{1}
$$

式中：θ 代表观测台站到震源的方位角；G 为各个滑断层产生的 Green 函数，下标 ss 代表纯走滑断层(倾角 90°，滑动角 0°)，ds 代表纯倾滑断层(倾角 90°，滑动角 90°)，dd 代表 45°的斜滑断层(倾角 45°，滑动角 90°)[11]，ep 是纯爆炸源的 Green 函数；z，r，t 分别代表垂向、径向和切向。式(1)的优点在于对所反演矩张量不设任何约束条件，不仅能反演双力偶成分(DC)，还能准确地反演对角线成分(ISO)和线性偶极补偿源成分(CLVD)。

2 实际应用

2.1 地下核爆炸震源矩张量反演

对 Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS)乌鲁木齐站记录到质量较好的苏联的 7 次地下核试验进行分析，采用适合东哈萨克斯坦地区的 Steven 模型来计算理论 Green 函数[12]，震中距取 970 km，震源时间函数采用光滑的阶跃函数[13]。图 1 是对代号为 88044 事件记录数据进行处理的结果，处理顺序依次为：去均值并采用反卷积(图 1(a))、去倾校正(图 1(b))，同时均采用反卷积仪器传递函数；将数据旋转到 z、r、t 分量(图 1(c))；利用 Butterworth 滤波器进行滤波，滤波周期为 50 s 到 100 s (图 1(d))；图中：BHE、BHN 和 BHZ 分别代表东、北和竖直方向。

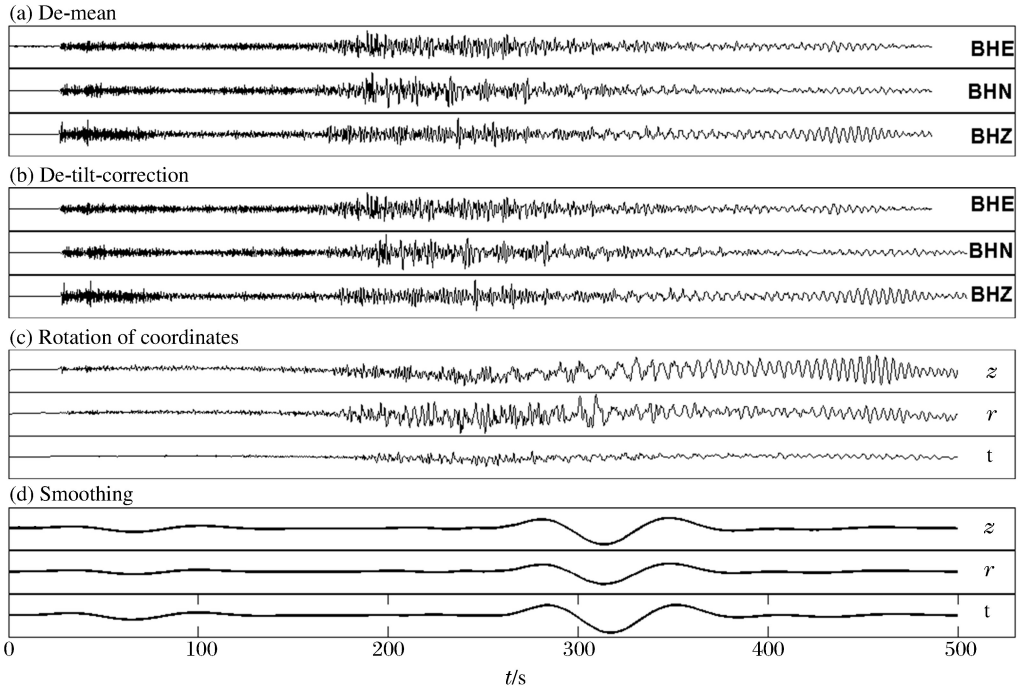


图 1 88044 事件波形处理

Fig. 1 Processing procedure of 88044 event

对基本 Green 函数进行相同周期范围的 Butterworth 滤波，利用式(1)对 88044 事件进行矩张量反演，与实际观测数据进行方差缩减(VR)计算，取方差缩减最大结果为最佳解[14-15]。一般情况下，地下核试验的爆炸装置埋深在 1.5 km 以内，理论 Green 函数的震源深度为 0.2～1.5 km，步长为 0.1 km，地震矩统一取为 $M_0 \approx 10^{17}$ N·m。震源矩张量反演结果为：

$$\boldsymbol{M} = M_0 \begin{bmatrix} 0.740\,6 & -0.948\,9 & -0.133\,0 \\ -0.948\,9 & 0.840\,3 & 0.119\,7 \\ -0.133\,0 & 0.119\,7 & -0.371\,0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

88044 事件波形拟合结果如图 2 所示。

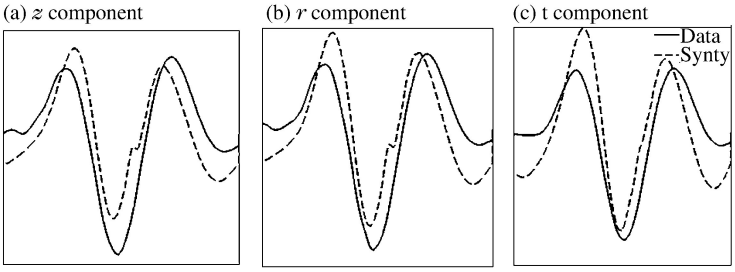


图 2　88044 事件观测数据与理论数据比较

Fig. 2　Comparison between data and synthesis of 88044 event

采用 Bowers 等[16]的方法对矩张量进行分解，该分解方法的优点在于可以直接计算出 ISO、DC、CLVD 源成分的比重：

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_{\mathrm{ISO}} + \boldsymbol{M}_{\mathrm{DC}} + \boldsymbol{M}_{\mathrm{CLVD}} \tag{3}$$

矩张量 $\boldsymbol{M}$ 的特征值及其分解结果为[17]：

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} -0.386\,8 \\ -0.158\,9 \\ 1.755\,6 \end{bmatrix} = 0.403\,3 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + 0.227\,9 \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + 1.124\,4 \begin{bmatrix} -0.5 \\ -0.5 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

对 88094 事件进行矩张量反演，过程与处理 88044 事件过程相同，反演得到的震源矩张量为：

$$\boldsymbol{M} = M_0 \begin{bmatrix} 1.234\,6 & 1.631\,0 & -0.092\,3 \\ 1.631\,0 & 1.406\,0 & 0.083\,1 \\ -0.092\,3 & 0.083\,1 & -0.630\,8 \end{bmatrix} \tag{5}$$

88094 事件波形拟合结果如图 3 所示。矩张量 $\boldsymbol{M}$ 的特征值及其分解结果为：

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} -0.67 \\ -0.27 \\ 2.95 \end{bmatrix} = 0.67 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + 0.40 \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + 1.88 \begin{bmatrix} -0.5 \\ -0.5 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

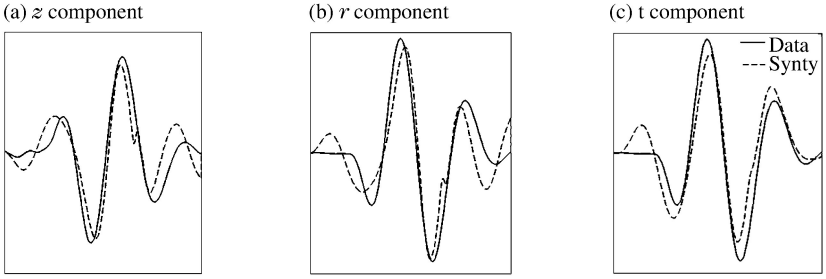


图 3　88094 事件观测数据与理论数据比较

Fig. 3　Comparison between data and synthesis of 88094 event

对 88125 事件反演得到的震源矩张量为：

$$\boldsymbol{M}=M_0\begin{bmatrix}0.964\,1 & 1.208\,7 & -0.037\,8\\ 1.208\,7 & 1.091\,1 & 0.034\,1\\ -0.037\,8 & 0.034\,1 & -0.384\,8\end{bmatrix} \tag{7}$$

88125 事件波形拟合结果如图 4 所示。矩张量 $\boldsymbol{M}$ 的特征值及其分解结果为：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}-0.40\\ -0.17\\ 2.25\end{bmatrix}=0.56\begin{bmatrix}1\\ 1\\ 1\end{bmatrix}+0.23\begin{bmatrix}-1\\ 0\\ 1\end{bmatrix}+1.46\begin{bmatrix}-0.5\\ -0.5\\ 1\end{bmatrix} \tag{8}$$

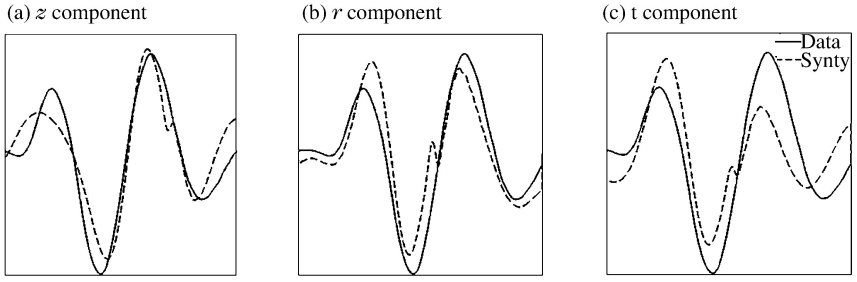


图 4 88125 事件观测数据与理论数据比较

Fig. 4 Comparison between data and synthesis of 88125 event

同理，对代号分别为 88258、89189、88352、88317 的事件数据进行了震源矩张量反演，对 7 次地下核试验的矩张量结果进行分析，分别得到 EXP 源（数值同 ISO 成分）、DC 源和 CLVD 源在震源中所占比重，结果见表 1。

表 1 苏联 7 次地下核试验的震源矩张量解

Table 1 Moment tensor of seven underground nuclear tests

试验编号	EXP	DC	CLVD	VR
88125	24.89%	10.22%	64.89%	87.77%
88094	22.71%	13.56%	63.73%	89.06%
88258	19.95%	13.83%	66.22%	83.72%
89189	28.16%	13.74%	58.10%	73.97%
88044	22.97%	12.98%	64.05%	85.26%
88352	35.09%	14.40%	50.51%	81.36%
88317	38.67%	7.98%	53.35%	78.91%

由表 1 可以看出，7 次地下核试验的震源矩张量反演结果中，均包含 EXP 源及矩张量迹为“零”的成分，地下核爆炸震源的球对称机制可以解释 EXP 源成分的存在。将迹为“零”的成分进一步分解为 DC 源和 CLVD 源，明显地看出，CLVD 成分普遍较大，与 Dreger 等[18]给出的统计结果是一致的。爆炸导致的震源区应力破裂及层裂介质回落拍击的物理过程[19-22]，可以很好地解释 CLVD 成分。震源区介质的各向异性以及路径中的构造应力释放等，均可以导致剪切位错成分的存在，从结果来看，DC 源比重最小，而天然地震的震源机制主要为 DC 源，说明地下核试验的震源机制与天然地震是不同的。成分较大 CLVD 源，必然会体现在地下核爆炸激发的地震波波形数据中，其对角分量的偏差，可以直接激发 S 波，该波速度普遍低于上地幔 S 波速度，这样会在 Moho 面反射，形成能量很大的导波，继而导致地下核试验的波形数据中含有丰富的低频 Lg 波，实际地下核爆炸地震波数据中，可以普遍的观察到这一现象。

2.2 天然地震震源矩张量反演

采用同样的方法，对 IRIS 中乌鲁木齐台站记录到质量较好的苏联地下核试验场附近发生的 3 次天然地震事件的震源矩张量进行了反演，3 次事件的基本参数如表 2 所示，计算理论 Green 函数的震源深

度采用 Global CMT Project 给出的结果。

表 2 苏联地下核试验场中天然地震的相关信息

Table 2 Information about the three natural earthquakes

事件代号	事件日期	震中位置	震源深度	震级/Mb
08029	2008-01-29	49.74N,83.48E	24.8km	4.6
08111	2008-04-20	45.97N,82.73E	21.9km	4.9
98193	1998-07-12	47.79N,82.78E	35.4km	5.2

对天然地震进行相同步骤的反演，08029 事件反演结果为：

$$\boldsymbol{M}=M_0\begin{bmatrix}-5.0908 & -6.6756 & 1.3793\\ -6.6756 & 6.3099 & -1.2645\\ 1.3793 & -1.2645 & -0.6965\end{bmatrix} \tag{9}$$

08029 事件波形拟合结果如图 5 所示。矩张量 $\boldsymbol{M}$ 的特征值及其分解结果为：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}-8.2396\\ -0.9135\\ 9.6757\end{bmatrix}=0.1742\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}+7.3261\begin{bmatrix}-1\\0\\1\end{bmatrix}+2.1754\begin{bmatrix}-0.5\\-0.5\\1\end{bmatrix} \tag{10}$$

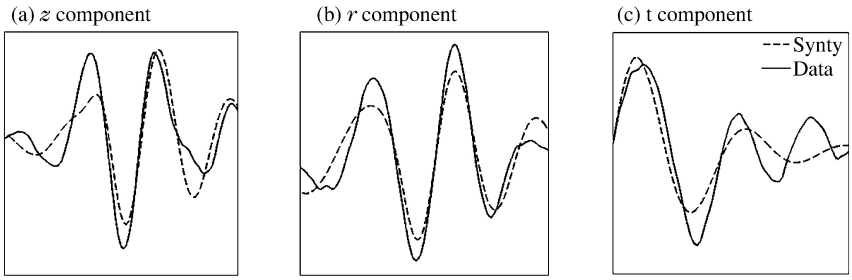


图 5 08029 事件观测数据与理论数据比较

Fig. 5 Comparison between data and synthesis of 08029 event

图 6 为事件 08111 的波形拟合结果，震源矩张量反演结果为：

$$\boldsymbol{M}=M_0\begin{bmatrix}0.0367 & -0.0803 & 1.5271\\ -0.0803 & 0.0636 & -1.6823\\ 1.5271 & -1.6823 & 0.3605\end{bmatrix} \tag{11}$$

矩张量 $\boldsymbol{M}$ 的特征值及其分解结果为：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}-2.029\\ -0.031\\ 2.5209\end{bmatrix}=0.1536\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}+1.998\begin{bmatrix}-1\\0\\1\end{bmatrix}+0.3692\begin{bmatrix}-0.5\\-0.5\\1\end{bmatrix} \tag{12}$$

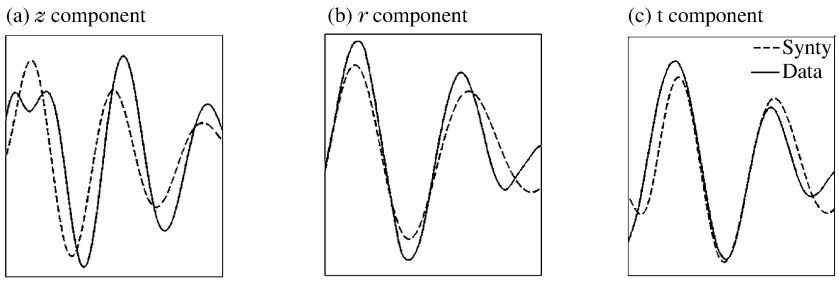


图 6 08111 事件观测数据与理论数据比较

Fig. 6 Comparison between data and synthesis of 08111 event

事件 98193 的矩张量反演结果为：

$$\boldsymbol{M}=M_0\begin{bmatrix}0.4216 & -0.0016 & 1.0429\\ -0.0016 & 0.3435 & -1.0757\\ 1.0429 & -1.0757 & 0.6834\end{bmatrix} \tag{13}$$

98193 事件波形拟合结果如图 7 所示，其矩张量 $\boldsymbol{M}$ 的特征值及其分解结果为：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}-0.9732\\ 0.3823\\ 2.0393\end{bmatrix}=0.4828\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}+1.3555\begin{bmatrix}-1\\0\\1\end{bmatrix}+0.201\begin{bmatrix}-0.5\\-0.5\\1\end{bmatrix} \tag{14}$$

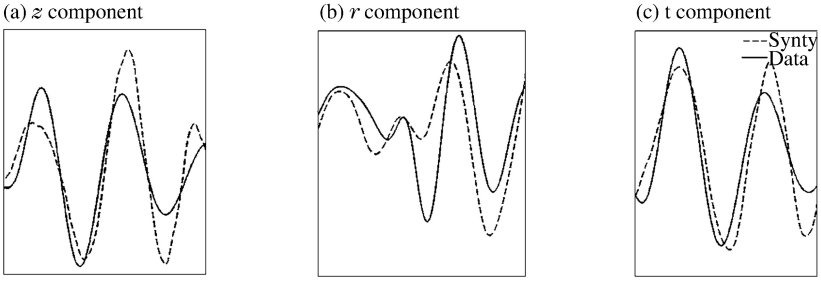


图 7 98193 事件观测数据与理论数据比较

Fig. 7 Comparison between data and synthesis of 98193 event

对于这 3 次天然地震的矩张量结果进行分析，同样得到 EXP 源、DC 源和 CLVD 源在震源中所占比重，结果见表 3。

表 3 苏联地下核试验场附近天然地震震源矩张量解

Table 3 Moment tensor of underground nuclear tests

试验编号	EXP	DC	CLVD	VR
08029	1.8%	75.72%	22.48%	86.69%
08111	6.1%	79.26%	14.64%	85.21%
98193	23.66%	66.47%	9.87%	83.33%

由上表的反演结果看出，相对地下核试验的震源矩张量反演结果来说，三次事件的震源中的 DC 成分是主要成分，天然地震的震源机制主要为剪切位错模式，这可以作为这 3 次事件中 DC 成分普遍大的合理解释。EXP、CLVD 成分存在的原因是比较复杂的，对火山地震及深源地震震源的研究结果发现普遍存在 CLVD 成分，本文采用的一维模型，会忽略横向不均匀的效应。理论上来讲，算法也许会将 EXP、DC 以外的效应折合到 CLVD 成分中。

综上所述：在含有噪声、震相到时误差、地壳模型误差及震源深度误差等情况下，基于本文的公式的反演方法都能得到比较准确、稳定的结果[5,23-24]。

3 结 论

对苏联实际地下核爆炸试验的反演结果表明，地下核爆炸的震源含有明显的爆炸源成分，非爆炸源成分主要是缘于构造应力释放和介质的不均匀性，CLVD 源可看作是地下核爆炸中层裂震源机制的良好模型，其物理机制主要表现为层裂破裂介质的回落，此过程时间短，整体效果表现为无体积变化，CLVD 源成分较大，稳定地分布在 55%～65%之间，这种稳定的比重与地下核爆炸震源物理机制相关。3 次发生在核试验场附近的天然地震震源机制反演结果表明，DC 源占主要成分，符合天然地震震源为剪切位错模式的普遍结论。由于 WMQ 台站距试验场有近 1 000 km，地震波的传播路径和地壳速度模型对反演结果会有影响，同时台站的记录数据可能受到较大的干扰因素，数据质量会受到影响，因此由

一维地壳速度模型反演得到准确的结果是比较困难的。

参考文献：

[1] WANG C Y, HERRMANN R B. A numerical study of P, SV, Sh-wave generation in a plane layered medium[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1980,70(4):1015-1036.

[2] MINSON S E, DREGER D S. Stable inversions for complete moment tensors[J]. Geophysical Journal Internation, 2008,174(2):585-592.

[3] STUMP B W, JOHNSON L R. The determination of source properties by the linear inversion of seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1977,67:1489-1502.

[4] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology, theory and methods[M]. San Francisco: W H Freeman, 1980.

[5] 何永锋，李锴，刘炳灿，等. 基于面波数据的地下核爆炸的全元素矩张量反演方法[J]. 爆炸与冲击. 2017,37(5):945-950.
HE Yongfeng, LI Kai, LIU Bingcan, et al. Full moment tensor inversion method of underground nuclear explosions based on surface waves data[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(5):945-950.

[6] JOST M L, HERRMANN R B. A student's guide to and review of moment tensor[J]. Seismological Research Letters, 1989,60(2):37-57.

[7] DREGER D, HELMBERGER D. Determination of source parameters at regional distances with three-components sparse network data[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1993,98:8107-8125.

[8] SAIKIA C K. Modified frequency-wavenumber algorithm for regional seismograms using Filon's quadrature: modeling of Lg waves in eastern North America[J]. Geophysical Journal Internation, 1994,118(1):142-158.

[9] CHEN X F. A systematic and efficient method of computing normal modes for multilayered half-space[J]. Geophysical Journal Internation, 1993,115(2):391-409.

[10] YAO Z X, HARKRIDER D G. A generalized reflection-transmission coefficient matrix and discrete wavenumber method for synthetic seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983,73(6):1685-1699.

[11] LANGSTON C A. Source inversion of seismic waveforms: the Koyna, India, earthquakes of 13 September 1967 [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981,71(1):1-24.

[12] MCLAUGHLIN K L, BARKER T G, DAY S M, et al. Effects of depth of burial on explosion and earthquake regional seismograms: regional discrimination and yield estimation: SSS_R_88_9844[R]. La Jolla, California, 1988.

[13] DAY S M. Surface waves from underground explosions with spall: analysis of elastic and nolinear source models [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983,73(1):247-264.

[14] 林向东，葛洪魁，徐平，等. 近场全波形反演：芦山 7.0 级地震及余震矩张量解[J]. 地球物理学报，2013,56(12):4037-4047.
LIN Xiangdong, GE Hongkui, XU Ping, et al. Near field full waveform inversion: Lushan magnitude 7.0 earthquake and its aftershock moment tensor[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013,56(12):4037-4047.

[15] TEMPLETON D C, DREGER D S. Non-double couple earthquakes in the long valley volcanic region[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006,96(1):69-79.

[16] BOWERS D, HUDSON J A. Defining the scalar moment of a seismic source with a generak moment tensor [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999,89(5):1390-1394.

[17] FORD S R, DREGER D S, WALTER W R. Identifying isotropic events using an improved regional moment tensor inversion technique[J]. Journal of Geophysical Research, 2008,114(B1). DOI: 10.1029/2008jb005743.

[18] DREGER D, WOODS B. Regional distance seismic moment tensors of nuclear explosions[J]. Tectonophysics, 2002,365(1):139-156.

[19] MASSE R P. Review of seismic source models for underground nuclear explosions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981,71(4):1249-1268.

[20] PATTON H J. Source models of the HARZER explosion from regional observations of fundamental-mode and

higher mode surface waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988,78(3),1133-1157.

[21] 何永锋,陈晓非,张海明.地下核爆炸 Lg 波的激发机制[J].地球物理学报,2005,48(2):367-372.
HE Yongfeng, CHEN Xiaofei, ZHANG Haiming. The excitation of Lg wave by underground nuclear explosions [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005,48(2):367-372.

[22] 何永锋,赵克常,张献兵.地下核爆炸地震波二次源特征[J].地球物理学报,2012,55(5):1742-1748.
HE Yongfeng, ZHAO Kechang, ZHANG Xianbing, et al. The characteristic of the waveform from the second source induced by underground explosion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012,55(5):1742-1748.

[23] 郑建常,陈运泰.基于 Langston 分解和 Hilbert 变换约束的区域偏量矩张量反演方法及应用[J].地震学报,2012,34(2):171-190.
ZHENG Jianchang, CHEN Yuntai. Regional deviatoric moment tensor inversion based on Langston's decomposition and Hilbert transform constraints and its application[J]. Acta Seismologica Sinica, 2012,34(2):171-190.

[24] 许力生,陈运泰.震源深度误差对矩张量反演的影响[J].地震学报,1997,19(5):462-470.

Distinguishing underground nuclear test by full moment tensor inversion

HE Yongfeng[1], LI Kai[1], ZENG Legui[1], YAO Guozheng[1],
ZHAO Kechang[2], ZHANG Xianbing[2], LIU Bingcan[1]
(1. *Army Armored Forces Academy*, *Beijing* 100072, *China*;
2. *School of Earth & Space Sciences*, *Peking University*, *Beijing* 100871, *China*)

Abstract: The full moment tensor inversion is an important tool to monitor underground nuclear tests, thus has been employed in this paper to analyze the recorded data of seven underground nuclear tests and three natural earthquakes in the region of Eastern Kazakhstan. The results show that, except the obvious explosion source in underground nuclear tests, the components of double couple (DC) and compensate linear vector dipole (CLVD) also exist, in which the later plays a more important role and could be explained by the explosion-induced spall. In the case of natural earthquakes, the DC component is the main contribution, in consistent with the model of shear dislocation seismic source.

Keywords: underground nuclear test; surface wave; Green function; full moment tensor inversion; CLVD source

(责任编辑 王小飞)