

汪小厉、倪四道、陈伟文等, 2015, 2011 年 11 月 6 日美国俄克拉何马 5.6 级地震震源参数测定及成因初步研究, 中国地震, 31(2), 308 ~ 318。

# 2011 年 11 月 6 日美国俄克拉何马 5.6 级地震震源参数测定及成因初步研究

汪小厉<sup>1,2)</sup> 倪四道<sup>3)</sup> 陈伟文<sup>1,2)</sup> 吴为治<sup>1,2)</sup>

1) 中国科学技术大学地球和空间科学学院地震与地球内部物理研究所,

合肥市金寨路 96 号 230026

2) 蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 安徽 蒙城 233500

3) 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077

**摘要** 2011 年 11 月 6 日 3 时, 美国俄克拉何马州发生了 5.6 级地震。此次地震是该地区 100 多年以来的最大地震, 因该区地震活动性低, 故需要对此次地震成因开展研究。本文采用 CAP (Cut And Paste) 方法对该地震分别进行近震、远震以及近远震联合反演, 得到了震源机制解与震源深度。其中联合反演得到的机制解参数为: 节面 I :  $234^{\circ}/81^{\circ}/-170^{\circ}$ ; 节面 II :  $143^{\circ}/81^{\circ}/-9^{\circ}$ ; 震级为  $M_w = 5.6$ 。为了验证近震结果的可靠性, 采用不同模型对近震数据进行反演测试, 发现震源断层解结果有  $3^{\circ}$  的偏差, 震源深度结果有 0.5km 偏差。CAP 结果显示, 该地震的质心深度为 5.0km 左右, 属于浅源地震。同时, 根据地震震源参数的标度分析, 得到破裂区宽度约为 7.0km, 此次地震破裂区上缘可达 1.4km 深, 下缘深度达 8.4km。破裂上缘在该区域井的注水深度范围之内, 由此推测该地震可能与当地页岩气开采过程中的注水活动有关。

**关键词:** 俄克拉何马地震 震源深度 波形反演 注水触发

[文章编号] 1001-4683 (2015) 02-0308-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

2011 年 11 月 6 日 3 时 53 分 (世界协调时), 美国俄克拉何马州发生了 5.6 级地震。据美国地质调查局 (USGS) 报告, 此次地震震源深度为 5.2km, 震中距离首府俄克拉何马城东北约 80km, 其震中最大烈度为 VIII 度, 导致人员受伤、建筑物受损。阿肯色、伊利诺伊、德克萨斯和堪萨斯等 17 个州的部分地区有震感。在美国洛基山脉以东区域,  $M_w \geq 5.0$  地震的活动性低 (Keranen et al, 2013), 但于 2011 年 11 月 5 日、6 日、8 日在美国中东部的俄克拉何马州连续发生 3 个  $M_w \geq 5.0$  地震, 其中 5.6 级地震是该州有历史记录以来的最大地震, 强于 1952 年 4 月 9 日发生的  $M5.5$  地震。鉴于该州天然地震活动性低, 一些研究人员开始探索

[收稿日期] 2014-04-28; [修定日期] 2014-11-04

[项目类别] 中国科学院交叉创新团队以及 973 项目 (2014CB845901) 资助

[作者简介] 汪小厉, 女, 1990 年生, 在读硕士, 主要研究方向为地震学。E-mail: xiaoliw@mail.ustc.edu.cn

陈伟文: 通讯作者, E-mail: vincentc@ustc.edu.cn

此次地震非天然成因的可能性。由于此次  $M5.6$  地震震中附近存在较多的页岩气开采注水井,该地震是否与注水有关引人关注(Keranen et al,2013)。

美国页岩气研究、勘探与开采已有 100 多年的历史(徐建永等,2010),其技术手段已日趋成熟。在页岩气开采过程中,“水压致裂”是主要技术手段。而在水压致裂过程中,孔隙压力持续增长,可能会触发地震(Raleigh et al,1976; Hsieh et al, 1981; Talwani et al,1984、2007; Nicholson et al, 1990; Shapiro et al, 1999)。在美国俄克拉何马地区,因页岩气的大量开采,存在较多的注水活动,地震活动性显著增强,这些地震是否由注水触发已成为众多学者研究的焦点(Davis et al,1993; Holland,2011; Keranen et al,2013)。Davis 等(Davis et al, 1993)总结出的注水触发地震判断标准主要包括:注水与地震间存在时间联系、地震震中位置接近注水井以及震源深度接近井的深度等。首先,地震活动性  $M-t$  图并结合注水时间可以用来表明地震与注水之间的时间联系。其次,在台站方位角分布良好的情况下,能够较准确地测定地震的震中位置,从而得到震中位置与注水井位置的关系。同时,由于已知注水井的精确深度,所以地震震源深度与注水井的深度关系判断主要依赖于震源深度的准确测定。然而,震源深度是一个较难准确测定的参数,在台站稀疏地区,其误差一直较大,给注水地震的研究带来困难。例如,俄克拉何马州  $M5.6$  地震发生后,Keranen 等(2013)开展了地震成因研究,测定了地震序列的震源深度,并结合地震震中 3km 范围内注水活动(图 1),分析了注水活动与震源深度的关系。结果表明,自 1993 年以来,震源区内的注水活动逐渐开始(Oklahoma Corporation Commission Well Data System)<sup>①</sup>,震中附近的井 1、2、3 的注水深度在约 1.3~2.1km 范围内,和地震序列中一系列浅源地震的震源深度接近,据此提出地震与注水可能存在联系。然而,与美国地质调查局(USGS)等机构给出的该地震的震源深度(表 1)存在较大差异,一些地震的震源深度甚至可达 12km,与注水深度有明显差别。因此,需要对此次地震开展准确可靠的震源深度测定研究。

目前,可以利用大地测量学数据测定震源深度,也可以基于地震学中走时和波形的方法研究震源深度。基于走时测定震源深度的方法是利用 P、S 波的到时及到时差来计算震源深度,如 Hypo 系列程序(Klein,2007)等。但基于走时方法得到的震源深度的精度受到台站密度的限制,仅在台站分布密集时才能得到较高精度的震源深度。而地震波形中也含有对深度敏感的信息,可以利用震相的振幅、偏振及全波形信息来确定震源深度(罗艳等,2013)。其中,Zhao 等(1994)提出的 CAP(Cut And Paste)方法,是一种较有代表性的、基于波形反演震源深度等震源参数的自动化方法。对于近震数据,Pnl 波中包含了深度震相(如 sPg、sPn 等),且体波与面波间的相对强度也能够有效地约束深度。对于中等强度的地震( $M_w 5.5 \sim 6.5$ ),地震能够被全球台网清晰记录到(金笔凯等,2013),因此可以利用远震数据对震源深度参数进行研究。尤其对于近震台网稀疏的地震事件,远震波形数据可有效补充近台数据。同时,远震波形中的 pP、sP、sS 和 pS 等深度震相可以很好地约束震源深度。因此,综合利用近震、远震和近远震数据,可以得到较可靠的地震震源深度和震源机制解参数。

本文利用 CAP、CAPtele 及 CAPjoint 三种方法(陈伟文等,2012),分别对近震资料、远震资料和近、远震联合资料进行反演。同时,在对近震数据反演时进行不同模型测试,以验证

<sup>①</sup> <http://www.occpermit.com/WellBrowse>

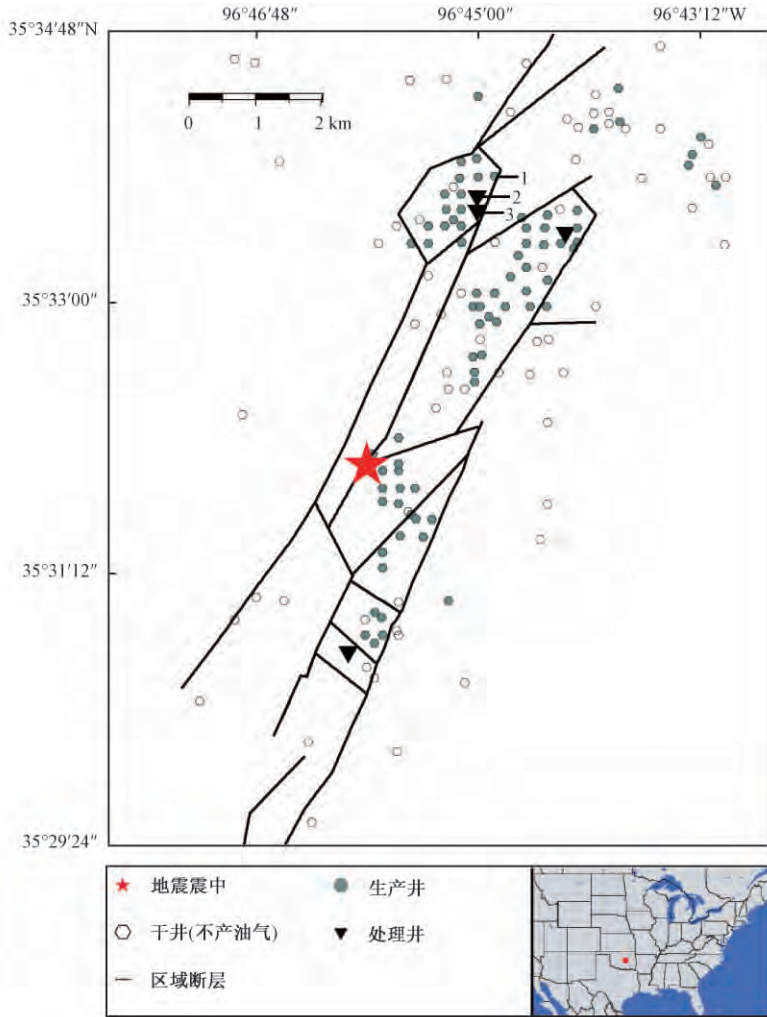


图1 俄克拉何马 5.6 级地震震中及注水井分布  
 右下角图中的实心圆点为所研究区域中心

近震 CAP 结果的准确性与可靠性。其中联合反演得到的深度为 4.9km, 该深度与注水深度较为接近。在本文中, 还利用地震震源参数的标度律 (Somerville et al, 1999) 分析, 得到破裂区宽度约为 7.0km, 此次地震破裂区上缘深度可达 1.4km 深, 下缘到 8.4km 深处, 在井 1、2、3 的注水深度范围内。由此推测该地震可能与当地页岩气开采过程中的注水活动有关。

表 1 俄克拉何马 5.6 级地震震源参数

来源		节面 I	节面 II	震级 ( $M_w$ )	震源深度 (km)
USGS	WPhase	329°/85°/-9°	60°/81°/-174°	5.6	11.0
	Region	55°/86°/-176°	324°/86°/-4°	5.6	7.0
	Centroid	235°/86°/164°	326°/74°/5°	5.7	12.1
GCMT		54°/88°/-178°	324°/88°/-2°	5.7	12.1
	SLU	235°/85°/-175°	145°/85°/-5°	5.6	8.0

## 1 方法和数据

### 1.1 方法

本文主要使用 CAP 及在此基础上发展的 CAPtele 和 CAPjoint 方法分别反演了俄克拉何马地区 5.6 级地震的震源深度及机制解参数。

CAP 方法主要是将宽频带近震波形截取为体波 (Pnl) 和面波部分, 分别计算其理论波形和实际波形的误差函数, 并在相关参数空间内进行网格搜索, 获得最优解。韦生吉 (2009) 对 CAP 方法做出了改进, 发展了 CAPtele 方法。该方法主要是利用远震 (震中距在  $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ) 体波中的垂直方向 (Z 分量) 的 P 波和切向 (T 分量) 的 SH 波进行反演, 而未使用 P 波垂向分量及径向分量, 这是因为: ① 台站下方地壳速度结构对远震 P 波的水平分量有较大的影响 (Langston, 1979); ② 远震 SV 波可能会受到 SPL 震相的干扰, 波形复杂 (Baag et al, 1985)。陈伟文等 (2012) 进一步发展了 CAPjoint 方法, 该方法结合近震和远震波形, 利用近震和远震震相对震源参数具有不同的敏感性, 并采用近震、远震独立的权重来计算误差函数, 从而得到震源深度及机制解参数。

### 1.2 数据及速度模型

本文的近震与远震波形数据来自于 IRIS 网站 ([www.iris.edu](http://www.iris.edu)), 为有效约束震源参数, 选取数据时要求近震与远震台站均具有较好的方位角分布 (图 2)。

在数据处理过程中, 首先挑选出具有较高信噪比以及 P 波初动清晰的近震波形数据。其次, 对于挑选出的数据, 将原始波形去除仪器响应, 进行大圆弧路径旋转得到 Z-R-T 三个分量。在反演过程中, 对于该地区地震的近震波形, 选取体波的带通滤波范围为  $0.02 \sim 0.5\text{Hz}$ , 面波的带通滤波范围为  $0.02 \sim 0.2\text{Hz}$ ; 而对于远震波形, P 波的带通滤波范围为  $0.01 \sim 0.15\text{Hz}$ , SH 波的带通滤波范围为  $0.01 \sim 0.1\text{Hz}$ 。选取这些频段, 既能满足地震点源近似的要求, 也可压制三维结构效应。

在反演过程中, 用频率-波数法 (F-K) (Zhu et al, 2002) 计算近震格林函数, 用 Holland (2011) 的 Central Oklahoma 速度模型作为震源区模型 (图 3)。而远震的格林函数则使用传播矩阵方法 (Kikuchi et al, 1982) 计算理论远震体波格林函数, 震源区同样选取 Holland (2011) 的 Central Oklahoma 速度模型。地幔模型采用 PREM (Dziewonski et al, 1981)。同时, 远震波形的非弹性衰减模型中, P 波和 SH 波分别选取 1s 和 5s 的  $t^*$  (Kikuchi et al, 1982) ( $t^*$  为远震体波非弹性衰减因子)。

## 2 结果和分析

### 2.1 震源深度和震源机制解

使用上述程序对波形进行了全面搜索, 得到其震源深度、震源机制解及矩震级。图 4 的 (a)、(b)、(c) 分别给出了近震、远震、近远震联合反演俄克拉何马地区 M5.6 地震的观测波形与理论波形拟合误差随深度的分布, 结果表明 3 种反演收敛效果较好。从图中可以看出, 在各个深度上, 震源机制解的变化较小, 说明 3 种反演方法得到的机制解比较一致, 为走滑型地震。图 5 给出了近远震联合反演得到的震源机制解及观测波形与理论波形的拟合结果。由图可知, 多数台站的波形拟合较好, 表明了结果的可靠性。

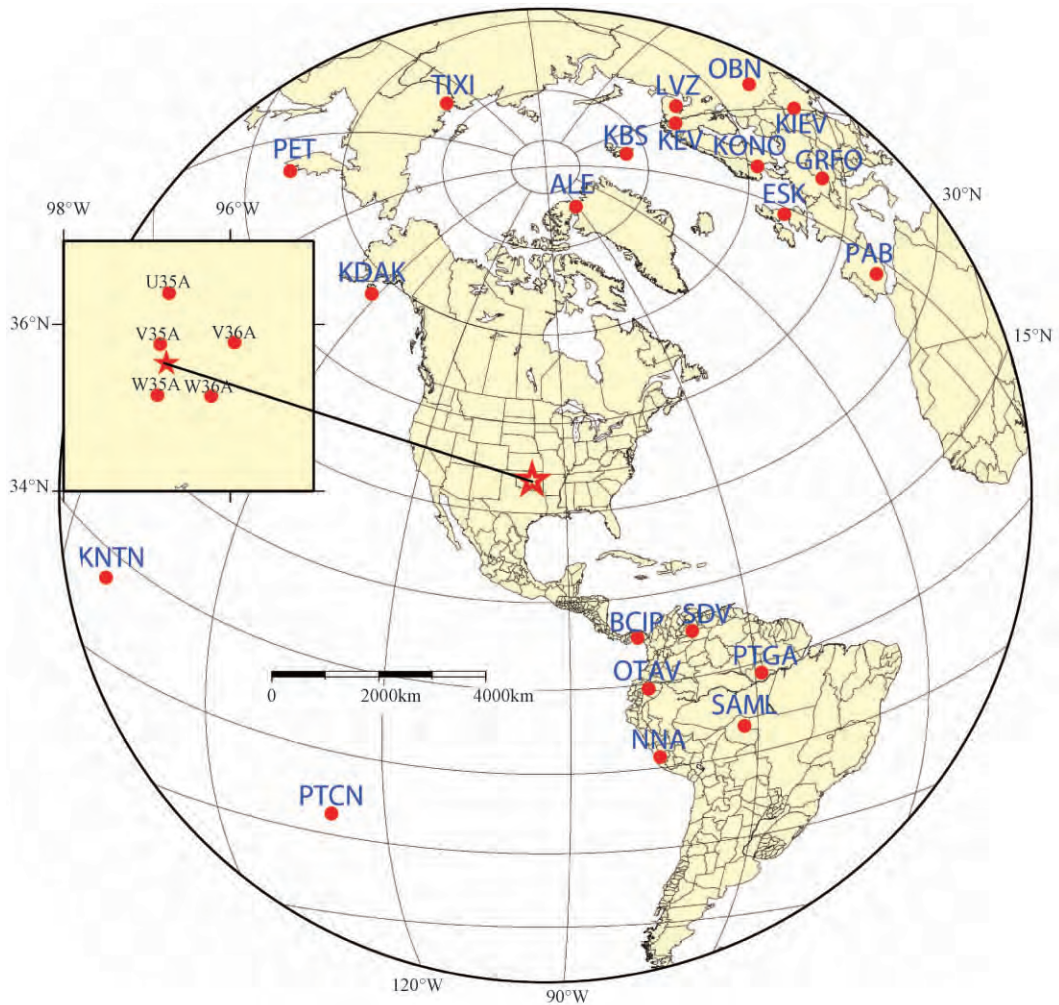


图2 俄克拉何马 5.6 级地震及近震远震台站分布

★表示 2011 年俄克拉何马地区 5.6 级地震震中；●表示反演过程中使用的近、远震台站，蓝色、黑色字母分别代表所使用远震、近震台站名称

近震数据反演得到的双力偶机制解结果见表 2。由表 2 可知，近震数据、远震数据及近远震数据联合反演的结果的一致性较好。

表 2 震源机制解结果

数据类型	节面 I	节面 II	震级 ( $M_w$ )	深度 (km)
近震	$52^\circ / 86^\circ / -180^\circ$	$322^\circ / 90^\circ / -4^\circ$	5.5	5.2
远震	$50^\circ (230^\circ) / 90^\circ / -180^\circ$	$320^\circ (140^\circ) / 90^\circ / 0^\circ$	5.8	5.7
联合反演	$143^\circ / 81^\circ / -9^\circ$	$234^\circ / 81^\circ / -170^\circ$	5.6	4.9

## 2.2 模型对近震结果的影响

为了考察 CAP 方法反演结果对速度结构的依赖性，我们选取 Mitchell 等 (1970) 给出的

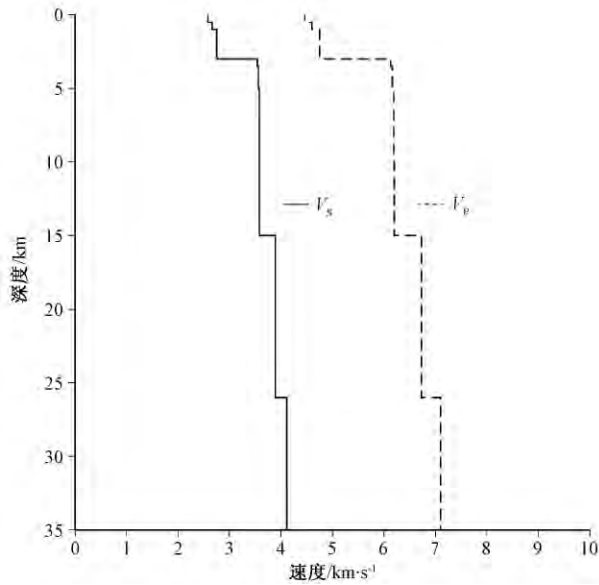


图 3 震源区速度模型

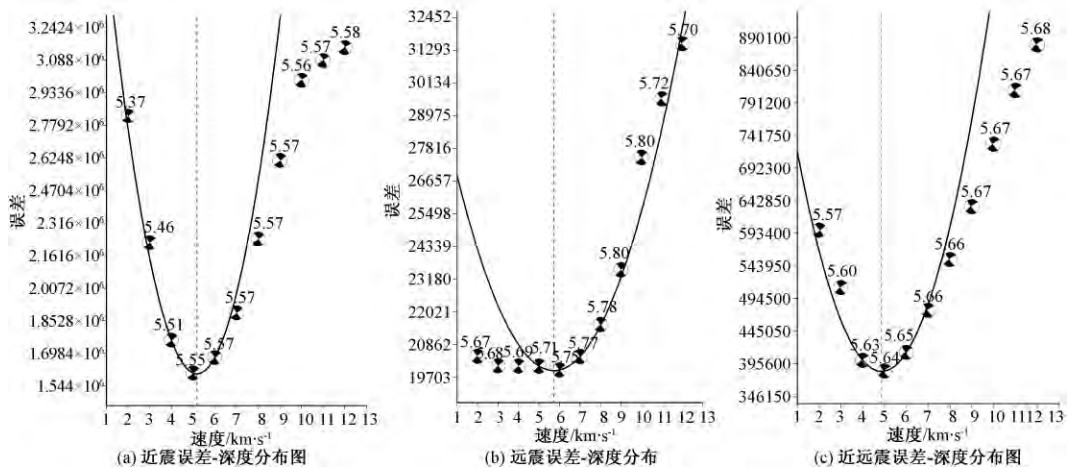


图 4 近震、远震及近远震反演的误差-深度分布图

Chelsea(图 6(a))以及 Tryggvason 等(1967)给出的 Tryggvason(图 6(c))模型对震源深度和震源机制解进行测试。对于 Chelsea 模型,反演得到的双力偶机制解为:节面 I 为  $53^{\circ}/89^{\circ}/-180^{\circ}$ ,节面 II 为  $323^{\circ}/90^{\circ}/-1^{\circ}$ ,震源深度为 4.7km。对于 Tryggvason 模型,双力偶机制解为:节面 I 为  $54^{\circ}/87^{\circ}/-180^{\circ}$ ,节面 II 为  $324^{\circ}/90^{\circ}/-3^{\circ}$ ,震源深度为 4.7km。两种模型与 Holland(2011)模型的近震反演震源深度结果相差在 0.5km 左右(图 6(b)、(d)),断层面解中各角度相差在  $3^{\circ}$  以内。根据上述结果,说明本研究中 CAP 方法反演震源深度与震源机制解结果是可靠的。

模型深度: 5 km; 震级Mw5.64; 节面 I 为143°/81°/-9°, 节面 II 为234°/81°/-170°, 滤波频段(Hz)为0.01/0.15/0.01/0.1。

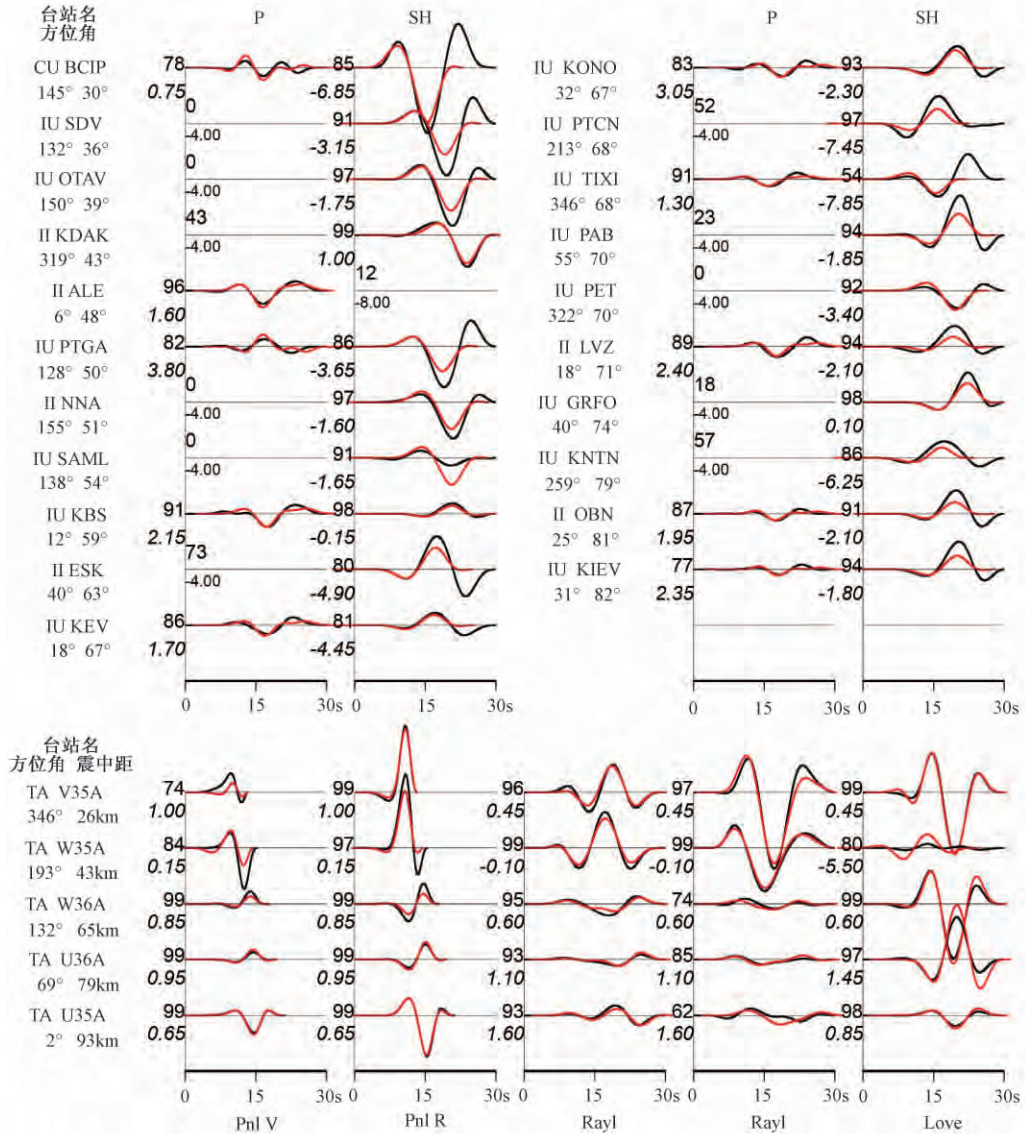


图5 俄克拉阿马 5.6 级地震联合反演结果

红色实线为观测数据, 红色为理论地震图; 波形左边的数字分别为理论和观测波形间最大相关系数百分比(上)、最大相关所需的时移(下); 台站名下方数字为方位角(°)(左)、震中距(km)(右)

### 3 结论与讨论

本文使用近震和远震连续波形数据, 采用 CAP 及以此为基础的其它方法分别对近震、远震和近远震联合反演, 得到了 2011 年 11 月 6 日美国俄克拉阿马州 5.6 级地震的震源深

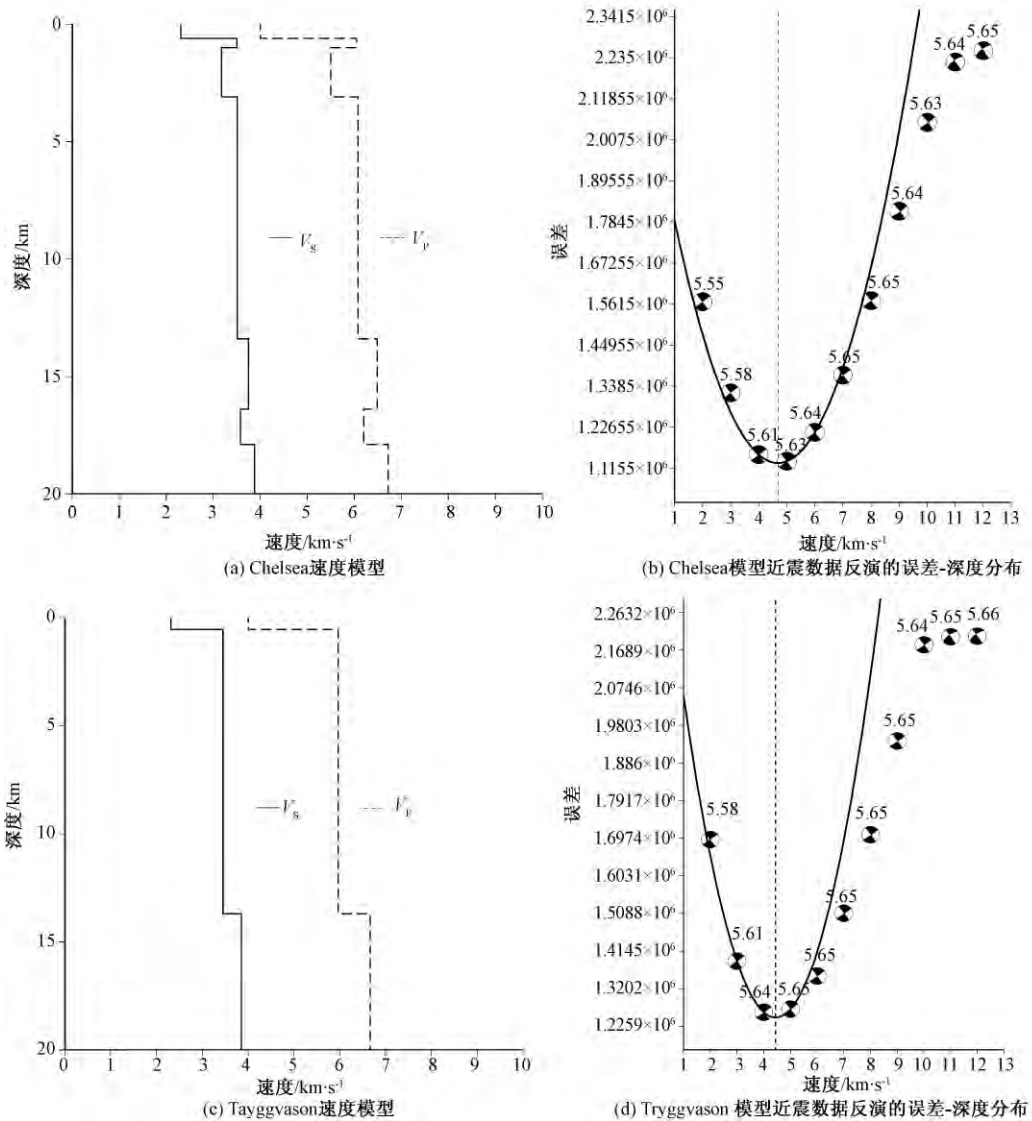


图6 不同速度模型反演得到的误差-深度分布图

度和震源机制解。同时,利用不同模型对震源深度及震源机制解进行了稳定性测试,发现其深度结果偏差在0.5km以内,机制解结果的偏差在 $3^{\circ}$ 以内。该地震是一个走滑型地震,质心深度为5km左右。与多数大陆构造地震的深度约在10km相比,此次地震偏浅。震源深度浅,考虑到研究区历史地震活动性低,加之近年来随着注水活动频繁地震活动明显增加等因素,可能表明此次地震非构造成因所致。

本文虽然基于传统点源地震学的CAP方法获取了断层面解、质心深度、矩震级等震源参数。然而,地震的点源描述不足之处在于对震源的描述相对简单,缺乏断层破裂的具体形态细节,如破裂方向等信息,这不利于更深入研究地震成因。地震的破裂方向问题是地震学研究中的重要课题,它约束了地震破裂起始位置与断层质心之相对方位,而地震破裂起始深



度是研究地震成因的重要参数。在本文中,若能准确测定出该地震的破裂方向并推断出地震破裂的起始深度,则可进一步验证注水过程与地震事件的相关性。我们采用地震震源参数标度分析,据联合反演得到的矩震级( $M_w$ 5.6),计算得到破裂区宽度约为7.0km,由此给出此次地震的破裂区域在垂直方向上的投影(Somerville et al,1999)(图7)。此次地震破裂区上缘可达1.4km深,在该地震震中附近的井1、2、3的注水深度范围之内,由此推测该地震可能与注水有关,这与 Keranen 等人(2013)的结果一致。

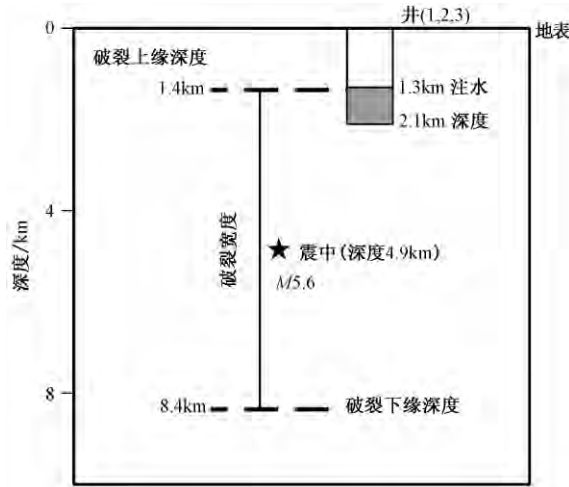


图7 地震破裂区域与注水井深度示意图

然而,地震与注水活动间的联系较复杂,震源深度仅提供一方面的信息,还需要对应力降、破裂速度、断层的历史地震活动性、井的注水时间序列、岩石物性等多方面因素的综合分析才能进行更深入研究。

致谢:感谢匿名审稿人提出的修改意见。近、远震波形来自 IRIS DMC,图片是用 GMT 软件包绘制的。

## 参考文献

- 陈伟文、倪四道、汪贞杰等,2012,2010年高雄地震震源参数的近远震波形联合反演,地球物理学报,**55**(7),2319~2328。
- 金笔凯、郑勇、熊熊,2013,2013年3月27日台湾南投 $M_w$ 6.0地震震源机制解与发震构造研究,中国地震,**29**(4),424~437。
- 罗艳、曾祥方、倪四道,2013,震源深度测定方法研究进展,地球物理学进展,**28**(5):2309~2321。
- 韦生吉,2009,稀疏台网震源参数方法研究,中国科学技术大学博士论文。
- 徐建永、武爱俊,2010,页岩气发展现状及勘探前景,特种油气藏,**17**(5),1~6。
- Baag C E, Langston C A,1985, A WKBJ spectral method for computation of SV synthetic seismograms in a cylindrically symmetric medium,Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, **80**(2), 387~417.
- Davis S D, Frohlich C,1993, Did (or will) fluid injection cause earthquakes? —criteria for a rational assessment, Seismological Research Letters, **64**(3~4), 207~224.
- Dziewonski A, Anderson D,1981, Preliminary reference Earth model, Physics of the Earth and Planetary Interiors, **25**(4), 297~356.
- Holland A, 2011, Examination of possibly induced seismicity from hydraulic fracturing in the Eola Field, Garvin County,

- Oklahoma. Oklahoma Geological Survey Open-File Report OF1 ~2011.
- Holland A, 2013, Earthquakes triggered by hydraulic fracturing in South-Central Oklahoma, *Bull Seism Soc Am*, **103** (3), 1784 ~ 1792.
- Hsieh P A, Bredehoeft J D, 1981, A reservoir analysis of the Denver earthquakes: A case of induced seismicity, *J Geophys Res: Solid Earth* (1978 ~ 2012), **86** (B2), 903 ~ 920.
- Keranen K M, Savage H M, Abers G A, et al, 2013, Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011  $M_w$  5.7 earthquake sequence, *Geology*, **41** (6), 699 ~ 702.
- Kikuchi M, Kanamori H, 1982, Inversion of complex body waves, *Bull Seism Soc Am*, **72** (2), 491 ~ 506.
- Klein F W, 2007, User's guide to HYPOINVERSE-2000: A Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes (pp. 1-123), US Geological Survey.
- Langston C A, 1979, Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *J Geophys Res: Solid Earth* (1978 - 2012), **84** (B9), 4749 ~ 4762.
- Llenos A L, Michael A J, 2013, Modeling earthquake rate changes in Oklahoma and Arkansas: Possible signatures of induced seismicity, *Bull Seism Soc Am*, **103** (5), 2850 ~ 2861.
- Mitchell B J, Landisman M, 1970, Interpretation of a crustal section across Oklahoma, *Geological Society of America Bulletin*, **81** (9), 2647 ~ 2656.
- Nicholson C, Wesson R L, 1990, Earthquake hazard associated with deep well injection.
- Raleigh C B, Healy J H, Bredehoeft J D, 1976, An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado, *Science*, **191** (4233), 1230 ~ 1237.
- Shapiro S A, Audigane P, Royer J J, 1999, Large-scale in situ permeability tensor of rocks from induced microseismicity, *Geophysical Journal International*, **137** (1), 207 ~ 213.
- Somerville P, Irikura K, Graves R, et al, 1999, Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, **70** (1), 59 ~ 80.
- Talwani P, Acree S, 1984, Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity, *Pure and Applied Geophysics*, **122** (6), 947 ~ 965.
- Talwani P C L, Gahalaut K, 2007, Seismogenic permeability, *J. Geophys. Res.*, **112**, B07039.
- Tryggvason E, Qualls B R, 1967, Seismic refraction measurements of crustal structure in Oklahoma, *J Geophys Res*, **72** (14), 3738 ~ 3740.
- Zhao L S, Helmberger D V, 1994, Source estimation from broadband regional seismograms, *Bull Seism Soc Am*, **84** (1), 91 ~ 104.
- Zhu L, Rivera L A, 2002, A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media, *Geophysical Journal International*, **148** (3), 619 ~ 627.

## Determination of source parameters and seismogenic analysis of the *M*5.6 Oklahoma earthquake on November 6, 2011

Wang Xiaoli<sup>1,2)</sup> Ni Sidao<sup>3)</sup> Chen Weiwen<sup>1,2)</sup> Wu Weizhi<sup>1,2)</sup>

1) Laboratory of Seismology and Physics of Earth's Interior, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2) Mengcheng National Geophysical Observatory, Mengcheng 233500, Anhui, China

3) State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077, China

**Abstract** On November 6, 2011, a *M*5.6 earthquake occurred in Oklahoma, United States of America, which was the largest earthquake ever recorded in the region over a hundred years. We used CAP method (CAP, CAPtele, CAPjoint) to invert focal depth and mechanism of this earthquake, and the result shows that the double-couple solutions of CAPjoint is:  $234^\circ$ ,  $81^\circ$ ,  $-170^\circ$  for strike, dip and rake, respectively. The other nodal plane is  $143^\circ$ ,  $81^\circ$ ,  $-9^\circ$ . We also applied different models to verify that the CAP inversion result is effective, with  $3^\circ$  deviation in fault plane solution and 0.5km in focal depth. The result of CAP shows that the centroid depth of this event is 5km, being a shallow earthquake. Based on the scaling law of source parameters, we obtain the 7.0km width of rupture zone, top to 1.4km and bottom to 8.4km, within the range of water-injection depth of wells. This implies that the *M*5.6 earthquake is related to water-injection during shale gas exploration.

**Key words:** Oklahoma earthquake Focal depth Focal mechanism Waveform inversion  
Water-injection triggering