

郑建常、吕子强、许萍等, 2013, 濮阳小震集中区发震机理分析与讨论, 中国地震, 29(1), 11 ~ 25。

濮阳小震集中区发震机理分析与讨论

郑建常¹⁾ 吕子强¹⁾ 许萍¹⁾ 陈亚红²⁾ 赵金花¹⁾

1) 山东省地震局, 济南市文化东路 20 号 250014

2) 菏泽市地震局, 山东菏泽 274000

摘要 综合小震精定位和震源机制解两方面的结果, 对濮阳小震集中区小震丛集活动的发震机理进行了分析。双差定位结果显示, 大部分地震震源位于聊考主干断裂上, 与断层的产状吻合; 5 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制显示, 双力偶模型可以较好地解释观测波形, 小震震源机制主要为走滑型, 初动符号呈象限分布; 在参考了油田地质构造背景资料后, 对濮阳小震集中区中、小地震活动与油田采油作业之间是否存在注水诱发关系进行了讨论。

关键词: 双差定位 震源机制 注水诱发地震 三维断层模型

[文章编号] 1001-4683(2013)01-0011-15 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

冀鲁豫交界地区是华北地区中强地震活动较为集中的区域之一, 历史上曾经发生过 1830 年河北磁县 7.5 级和 1937 年山东菏泽 7.0 级等强烈地震。近年来, 该区连续发生中等地震活动, 尤其是河南濮阳与山东鄄城交界区, 自 1997 年以来形成了中、小地震活动的丛集区(震情跟踪中常称之为“濮阳小震集中区”)。该区地处中原油田的主采油区, 采油作业的大量注水有可能对地震活动存在诱发作用。近年来, 已有研究者从不同方面就油田注水作业对地震活动的影响进行了讨论^①(胡凤英等, 2005; 吕子强等, 2008)。濮阳小震集中区中、小地震活动是否存在注水诱发因素, 对于判定该区未来地震活动趋势至为重要。明确濮阳小震集中区中、小地震活动与油田注水的关系, 有助于对聊考断裂带的构造活动特性有更清晰的认识, 在对该区域的地震危险性估计、地震灾害快速评估以及地震趋势研究等方面也具有一定的参考价值。

对于油田注水作业对地震活动的影响以及注水诱发地震的性质等问题, 地震学界自 20 世纪中叶起就展开了研究(赵根模等, 1995; Ohtake, 1974; 刁守中等, 1990; Rutledge et al, 2004; Ake et al, 2005; 李行船等, 2007; 阮祥等, 2008; 张致伟等, 2012)。国内自 1962 年新丰

[收稿日期] 2012-09-14; [修定日期] 2012-10-06

[项目类别] 地震科技星火计划项目(XH12028Y)、全国地震大形势跟踪预测项目(1011600707)、山东省地震局重点科研项目(JJ1103Y)共同资助

[作者简介] 郑建常, 男, 1978 年生, 副研究员, 2011 年于中国地震局地球物理研究所获博士学位, 主要从事震源物理及地震活动性研究。E-mail: zjemail@yeah.net

① 菏泽市地震局, 2010, 菏泽市 2011 年度地震趋势研究报告, 58 ~ 60

江水库地震和 1977 年任丘油田注水诱发震群活动后,在这方面的研究也有了很大的进展(国家地震局地震研究所,1984)。任丘油田地区的震群活动是采油注水诱发地震的一个典型例子,并已得到了深入的研究(刁桂苓等,1982;张德元等,1990)。位于德国东南部的 KTB 超深钻,其钻孔深度达到 9km,在该场地上地球物理学家进行了大量的注水诱发地震的试验,取得了丰硕的研究成果(Jost et al, 1998; 涂毅敏等, 2002; Baisch et al, 2002; Shapiro et al, 2006)。一般来说,注水诱发地震具有以下几个特点:①地震的分布区域围绕注水井孔;②地震活动强弱与注水量和注水压力变化的快慢有关;③与岩石性质(岩石的孔隙度、渗透率等)有关;④注水诱发地震的深度小于构造地震深度,一般在 2~6km 之间;⑤震源机制可能偏离双力偶机制,在较大的流体压力下,有断层张裂的成分;⑥由于介质破碎,与构造地震相比,注水诱发地震的 b 值较高,应力降和尾波 Q 值较低。

本文根据小震精定位和震源机制解两方面的结果对濮阳小震集中区小震丛集活动的发震机理进行了分析:首先使用双差方法对濮阳小震集中区 2000 年以来的小震活动进行了重新定位,对小震深度分布与聊考断裂断层性质的关系进行分析讨论;然后通过收集山东、河北、河南等省测震台网记录到的观测资料,使用 3 分向宽频带数字波形反演了濮阳小震集中区 5 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制;最后进一步结合油田地质构造和中原油田采油注水的有关资料,对濮阳小震集中区中、小地震活动与油田采油作业之间是否存在注水诱发关系进行讨论。

1 数据与资料

图 1 给出了冀鲁豫交界地区 1997 年以来 $M_L \geq 2.0$ 地震的震中分布。由图 1 可见,小震活动集中分布在以河南省濮阳市范县濮城镇为中心,半径约 20km 的范围内,该区域 1996 年以前的现代小震目录中很少有 $M_L 2$ 以上地震活动。在该小震集中区范围内,历史上曾发生濮城 1502 年 $6\frac{1}{2}$ 级、1923 年 5 级等中、强地震。濮阳小震集中区位于聊城—兰考(简称聊考)断裂带中段,该断裂带南段曾发生 1937 年菏泽 7 级、 $6\frac{3}{4}$ 级等强烈地震,1983 年 11 月 17 日菏泽 $M_s 5.9$ 地震也发生在该断裂带上。

双差定位(hypoDD)方法自提出以来,在国内外得到了广泛的应用(杨智娴等,2002;华卫等,2006;王海涛等,2007;黄媛等,2008;房立华等,2011;王长在等,2011),已被证明是一种有效的提高地震相对定位精度的方法。为了更清晰地了解濮阳小震集中区小震活动的三维空间分布及其与区域范围内断层结构的关系,我们使用双差方法对该区的小震活动进行重新定位。使用的速度结构为许萍等^②给出的鲁西地区修正速度模型。

受观测资料的限制(鲁西地区 2000 年以后有数字记录资料),进行重新定位小震的时间范围从 2000 年 1 月~2012 年 6 月,其中 2000 年 1 月~2008 年 6 月的小震精定位结果由许萍等^②和吕子强等(2008)合作完成;2008 年 10 月~2012 年 6 月的结果由笔者完成。2008 年 10 月以前的震相数据来自于各省台网的月报和“大华北测震数据共享”网站,之后的震相到时数据来自于“全国地震编目系统”。重新定位时,要求记录每个地震的台站数不少于 3 个。

② 许萍等,2008,鲁西地区地震双差定位及断层分析,见:郑建常等,山东省 2009 年度地震趋势研究报告,168~171

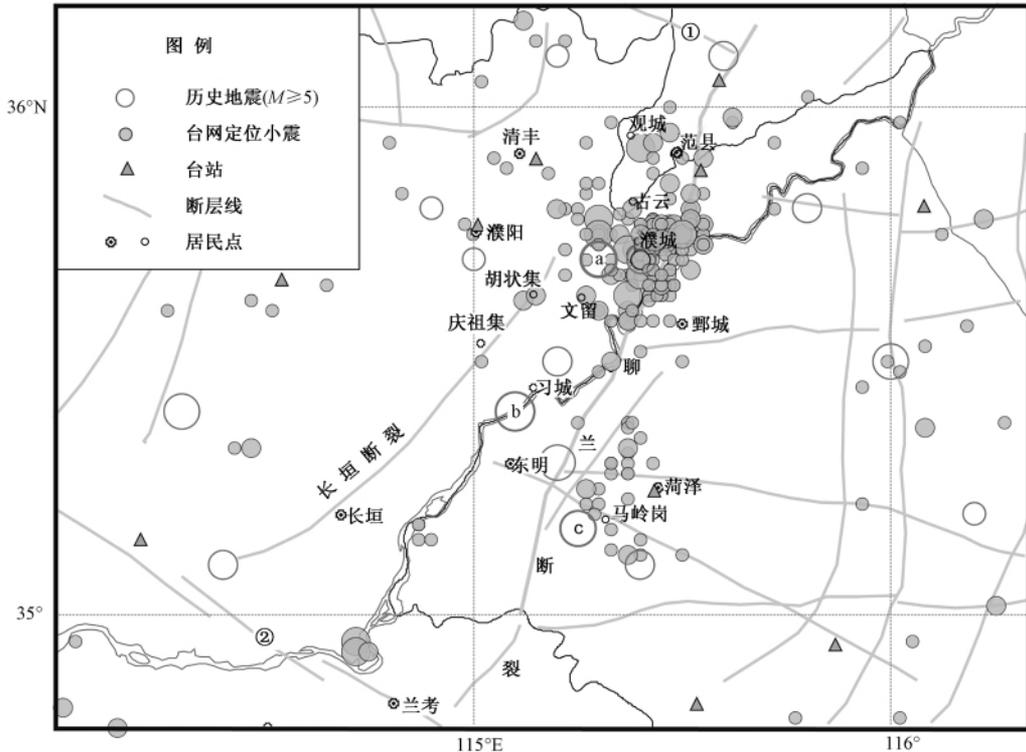


图1 本文研究区域内台站、断层、历史地震及1997年以来 $M_L \geq 2.0$ 现代小震分布图

①磁县-大明断裂;②新乡-商丘断裂。显著地震:a.1502年濮城6.5级;b.1937年菏泽7.0级;c.1983年菏泽5.9级

在使用双差方法定位前,首先对震相数据进行检查,根据P波、S波的时距曲线,剔除有明显错误或偏差较大的震相数据。图2给出了本文使用的震相数据的时距曲线(2008年10月~2012年6月),共计2257条Pg、2388条Sg以及486条Pn和81条Sn到时数据。在输入双差法的震相文件时,P波到时的权重为1.0,S波为0.5。

2 地质构造背景

濮阳小震集中区在构造背景上位于东濮凹陷,属下第三系裂陷盆地。东濮凹陷夹在鲁西隆起区、太行山隆起带、秦岭隆起带等构造体系之间,东以兰聊断裂与鲁西隆起为界,西部过长垣断裂后,逐渐过渡到内黄隆起;北跨马陵断裂进入临清坳陷的莘县凹陷,南以兰考凸起与开封凹陷相隔。东濮凹陷是一个以结晶变质岩系及其上地台构造层为基底,在新生代地壳水平拉张应力作用下逐渐裂解断陷而成的双断式凹陷(王婧韞等,2004;张克鑫等,2007),沿走向呈北窄南宽形态(图3)。

东濮凹陷在形成过程中主要受NNE和NE走向断裂控制,具体为聊兰、黄河、长垣等3组基底断裂(图3)。其中聊兰断裂为东濮凹陷与鲁西隆起的分界断裂,走向 $23^\circ \sim 32^\circ$,倾向NW,倾角 $40^\circ \sim 70^\circ$ 。据钻孔揭露,该断裂东西两侧上第三系和第四系厚度相差660m,说明该断裂继承性差异运动十分强烈,属深大活动断裂(胡长和等,1991)。除主干基底断层外,聊兰断裂还发育有一些小型基底断层和大量的盖层断层(图3),根据石油地质部门的研究

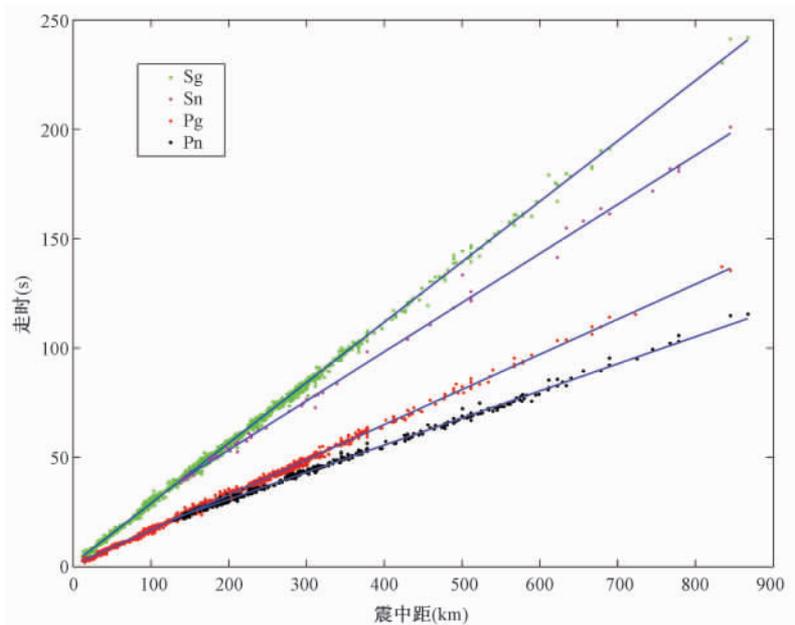


图2 双差定位使用的濮阳集中区地震不同震相的时距曲线

结果(程秀申等,2010),在濮阳小震集中区范围内涉及的次级断层有六塔断层、文明寨断层、卫西断层、卫东断层以及濮城断层等(见图3中编号6~10的断层线)。这些次级断层多是主干基底断层伸展位移诱导出的调节断层,也多具有正断层性质。它们分别以不同方式与主干基底断层连接在一起构成断层系,而主干基底断层向深部延伸也会与深层的拆离断层连接在一起,构成反映裂陷盆地构造基本特征的伸展连锁断层系统。

东濮凹陷是我国东部重要的石油天然气生产基地,是中国石化集团公司第2大油气田——中原油田的主要勘探开发区域。自1979年7月1日油田投产以来,在东濮凹陷上先后发现了文留、濮城、文明寨、卫城、文东、文南、马寨、古云集、胡状集、庆祖集、马厂、三春集、瓜营、白庙等14个油气田,投产钻井数千口(王婧媪等,2004)(图3)。直观地对比图1、3可以发现,在濮阳小震集中区的范围内,主要涉及濮城、文明寨、卫城、古云集等位于东濮凹陷北区南部的几个油田。

石油地质部门对东濮凹陷的构造地质情况进行了详细的研究(安舆等,1991;张克鑫,等,2007)。图4为根据程秀申等(2010)文中图2(a)重绘的垂直聊兰断裂的地震剖面。由图4可见,聊兰断裂为东濮凹陷的控凹断层,断层在剖面上总体表现为上陡下缓的铲式正断层特征,在中地壳层中拆离滑脱,拆离滑脱深度约为9~12km;断层上盘发育一系列同向基底断层,与聊考断层一起构成多米诺式构造。小震活动主要集中在濮城镇周边地区,根据石油地质部门的地震测线资料(阮怀宁,1993)(图3),这一地区由于卫东、文明寨等反向断层的发育使伸展连锁断层系统的基本样式发生变化,形成西断东掉的盖层断层叠加在东断西翘的多米诺式掀斜基底断块之上并沿基底岩层面滑脱的构造样式;中央构造带在剖面上可以出现X形交叉正断层系,并构成上堑下垒式构造组合(程秀申等,2010;安舆等,1991)。这一系列的张性羽状断层,在区域应力场以及重力作用和临近地块的运动影响下,彼此交错

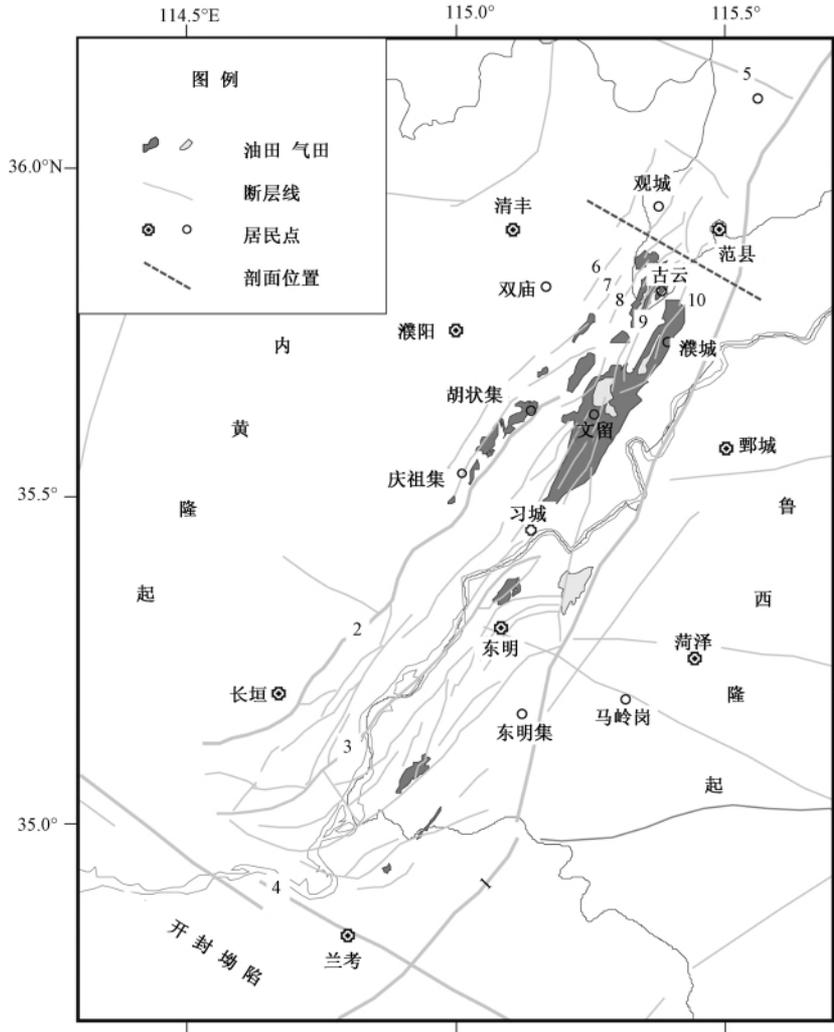


图3 东濮凹陷断层及油气田分布图(根据程秀申等(2010)文中图1及李国玉等(2002)文中图21“东濮凹陷”重绘)

1. 兰聊断裂; 2. 长垣断裂; 3. 黄河断裂; 4. 新乡-商丘断裂; 5. 磁县-大名断裂; 6. 六塔断层; 7. 文明寨断层; 8. 卫西断层; 9. 卫东断层; 10. 濮城断层

切割、互相作用, 呈现出不同的运动形式(樊满仓, 2008)。

3 双差定位结果分析

本文共得到 M_L 1.2~4.7 之间 137 次中、小地震的精定位结果(图5), 对比震中分布(图1), 可以看出双差定位后的震中位置更加集中, 成丛性更好, 且呈现出较为明显的 NNE 向带状分布, 与该区域断层的走向方向基本一致。

对比图3、5可以看出, 濮阳小震集中区的小震活动主要集中在以濮城为中心、北起古云南至文留的范围内, 而在文留以南的油田区域内, 则没有小震活动。因此就会引发这样的疑

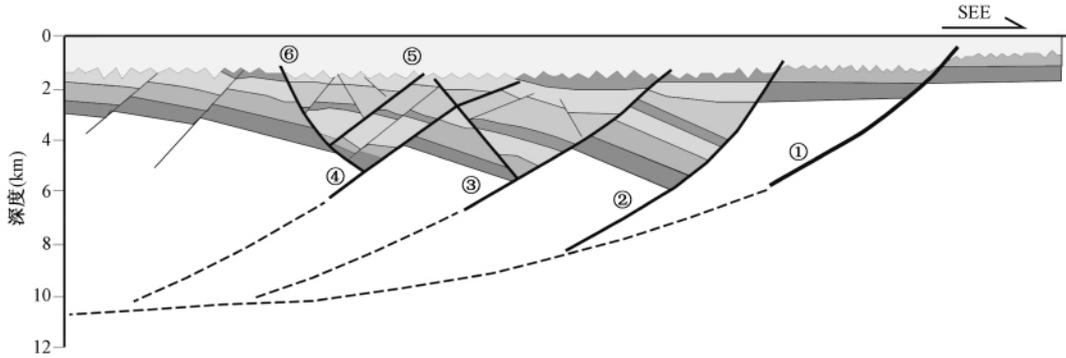


图4 东濮凹陷北段构造剖面(根据程秀申等(2010)图2(a)重绘,剖面位置见图3)
①和②兰聊断裂;③濮城断裂;④卫西断裂;⑤观城断裂;⑥宋庙断裂

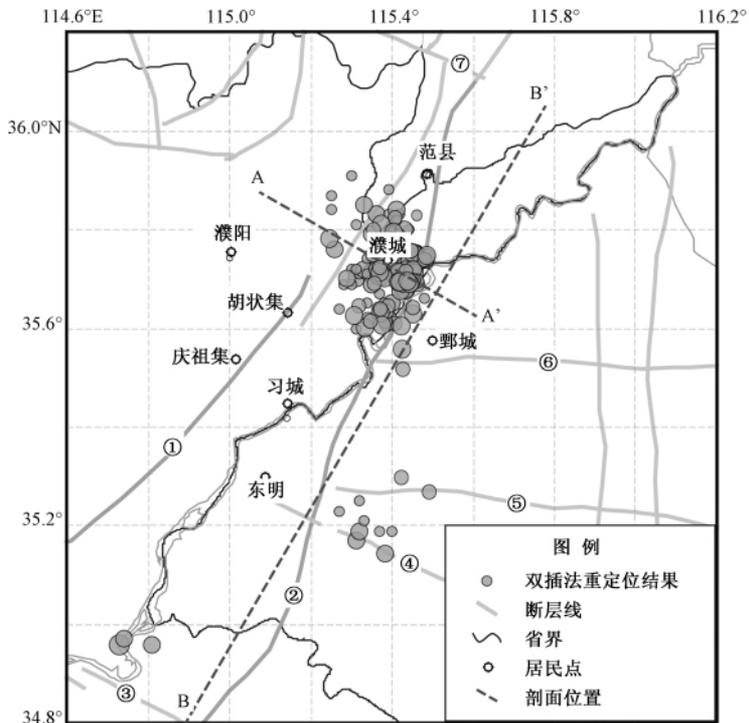


图5 精定位后的濮阳集中区地震震中分布图
①长垣断裂;②聊兰断裂;③新乡-商丘断裂;④东明-成武断裂;⑤菏泽断裂;⑥郓城断裂;⑦磁县-大名断裂

问:同样的采油注水过程,在近乎相同的地质构造背景和断层条件下,为何文留以北濮城镇周边地区小震集中活动,而胡状集-庆祖集-文留-习城一带则没有小震活动?

从深度分布上看,重新定位后的小震震源深度集中在7~10km之间,平均震源深度约8.4km。根据已有研究(赵根模等,1995)可知,注水诱发地震的深度一般在2~6km之间。

德国西北部超过 9km 的 KTB 大陆超深钻井的注水试验也表明,除 9km 深的井口附近发生少量水压破裂外,绝大部分诱发微震发生在 5 ~ 6km 的深度范围内 (Baisch et al, 2002)。Grasso 等对法国拉克气田注水诱发地震深度分布与天然构造地震的对比结果也显示,诱发地震的深度都在 5km 以内 (赵根模等, 1995)。我们对濮阳小震集中区小震精定位后的震源深度研究结果显示,这些小震的震源较一般注水诱发地震偏深。

沿图 5 垂直聊兰断裂的 A-A' 做小震震源深度的剖面图,并将图 4 中的几条主要断层投影到剖面图上,结果见图 6 (a)。由图 6 (a) 可见,小震震源深度的分布与聊兰断裂的断层线形态非常吻合,基本反映了断层的倾角变化和产状。由此似乎可以说明,濮阳小震集中区的小震活动可能是聊兰断裂构造活动的结果,而不是濮阳油田注水产生的直接诱发地震。

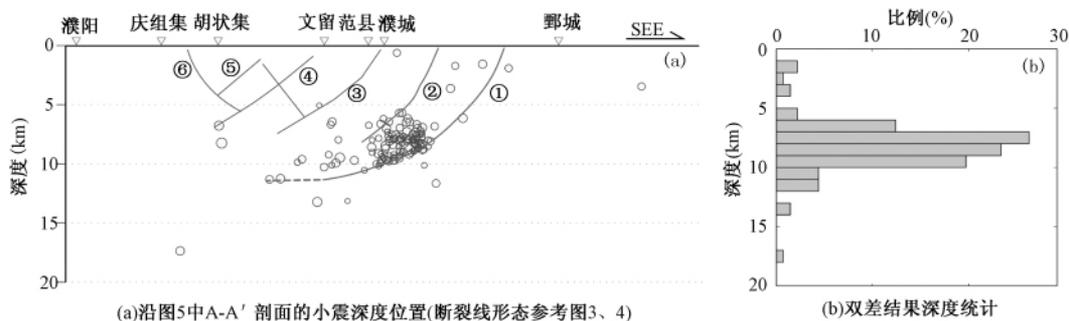


图 6 濮阳小震集中区小震精定位结果深度剖面及深度统计直方图

①和②聊兰断裂;③濮城断裂;④卫西断裂;⑤观城断裂;⑥宋庙断裂

沿图 5 中 B-B' 绘制沿着聊兰断裂走向的震源深度剖面,结果见图 7。图 5 中东明以东的几次地震为 1937 年菏泽 $M_s 5.9$ 地震老震区的地震活动,故没有投影到断层面上。由图 7 可见,小震集中分布在聊兰断裂带的文留-古云段,其余断层面基本为震源空白区。

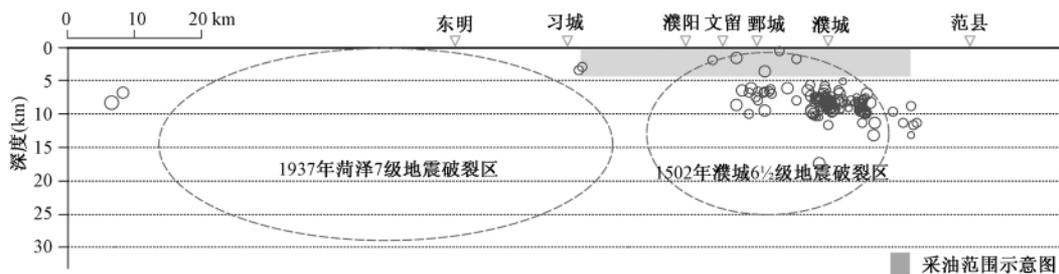


图 7 沿图 5 中 B-B' 剖面小震震源深度分布图

东濮凹陷有历史记载发生 $M \geq 6$ 地震 3 次,即 1502 年 10 月 27 日濮城 $M 6 \frac{1}{2}$ 地震、1937 年 8 月 1 日菏泽 $M 7.0$ 地震和 $M 6 \frac{3}{4}$ 强余震。对于 1937 年菏泽地震,虽然学界对此次地震的具体发震位置甚至极震区的长轴走向等仍存在不同看法,但普遍认为此次地震可能是聊兰断裂构造活动的结果 (胡长和等, 1991; 江娃利, 2006)。我们根据震级和断层破裂长度的经验公式 (Mohammadioun et al, 2001)

$$M = 1.49 \log L + 4.33, \quad (1)$$

取 1937 年菏泽 $M7.0$ 地震和 1502 年濮城 $M6\frac{1}{2}$ 地震的破裂长度分别为 60、30km, 菏泽地震的震源深度取 15km 左右, 濮城地震取 12km 左右, 图 7 中给出了这两次地震的大致破裂范围。

由图 7 可以看出, 濮阳小震集中区的小震活动范围与 1502 年濮城 $M6\frac{1}{2}$ 地震的震源破裂区大致重合。东濮凹陷的中南段, 也即图 7 中给出的 1937 年菏泽 $M7.0$ 地震震源区, 1970 年以来很少有小震活动。假设我们现在使用的《中国地震目录》给出的 1937 年菏泽 $M7.0$ 地震震中位置 (35.4°N 、 115.1°E) 是准确的, 并且确定是发生在聊兰主干断裂上, 那么可以认为, 由于 7 级地震的发生, 该区段积累的应力已经得到充分释放。

邓起东等(1994)的研究认为, 华北东部地区的断层上 $M \geq 7$ 大地震的重复周期在 3000 ~ 7000 年之间。假设断层面上的应变积累速率不变, 由于 6 级地震释放的应变能较 7 级地震小约 7 倍, 因此估计该区域的 6 级地震复发周期在 400 ~ 1000 年之间。1502 年濮城 $M6\frac{1}{2}$ 地震至今已离逝超过 500 年, 在其震源断层上应该又重新积累了一定水平的应变, 濮阳小震集中区与这次地震的破裂区大致重合, 可能也反映了这一情况。

4 震源机制解结果分析

自 20 世纪 90 年代以来, 随着高增益、大动态范围的数字地震仪的广泛应用, 小震乃至微震的矩张量反演也得到了很大的发展。一些特殊地震的矩张量分析表明 (Millar et al, 1998; Trifu et al, 2002; Vavryčuk, 2002), 在某些情况下 (如水库蓄水、采油作业注水、火山活动和地热喷发以及由于坍塌、陷落引发的矿震等), 地震震源机制中的非双力偶分量所占的比例可能非常大。Rutledge 等 (1998) 使用小震综合机制解研究石油生产中记录到的一些小震活动的震源机制。Jost 等 (1998) 和 Dahm 等 (1999) 分别发现由于压水试验诱发的花岗岩和盐岩内的微震震源机制中的非双力偶成分约为 10% ~ 15%。Cuenot 等 (2006) 计算了大块花岗岩注水诱发的多个地震的矩张量, 他们注意到由于较大的水压影响, 注水井邻近地区的震源的非双力偶成分变得更加显著。从物理机制上来说, 在油田采油注水过程中, 随着注水压力的增大, 流体压力足以抵消地球内部的岩石应力, 在岩石破裂过程中, 处于高压状态下的流体迅速填充破裂区, 导致断层错动过程中伴随向两侧的张裂, 从而使得地震的辐射花样出现不同于点源位错模型的变化 (Fischer et al, 2011; Sileny et al, 2009)。

我们使用 ISOLA (Sokos et al, 2008) 反演求解了濮阳地震集中区 5 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的矩张量解^③, 从反演结果看, 约束为双力偶震源机制的解可以较好地解释大部分台站的观测波形。

自 2006 年以来, 随着数字化测震台网的投入使用以及相关软件的推广, 利用小震初动符号和波形振幅比资料进行震源机制求解已经成为各省 (市、自治区) 地震局例行的工作内容, 基本上每次 $M_L \geq 2.0$ 地震后都会给出相应的震源机制结果。图 8 给出了濮阳小震集中区 2002 年以来 32 次 $M_L \geq 2.0$ 地震以及附近 7 次地震的震源机制解, 结果显示大部分的小震机制为走滑型。

图 9 给出了濮阳小震集中区 3 次中、小地震的初动符号解结果。虽然受台站密度和布

^③ 郑建常等, 待刊, 2010 年 1 月 15 日濮阳 $M_L 4.2$ 地震震源机制反演

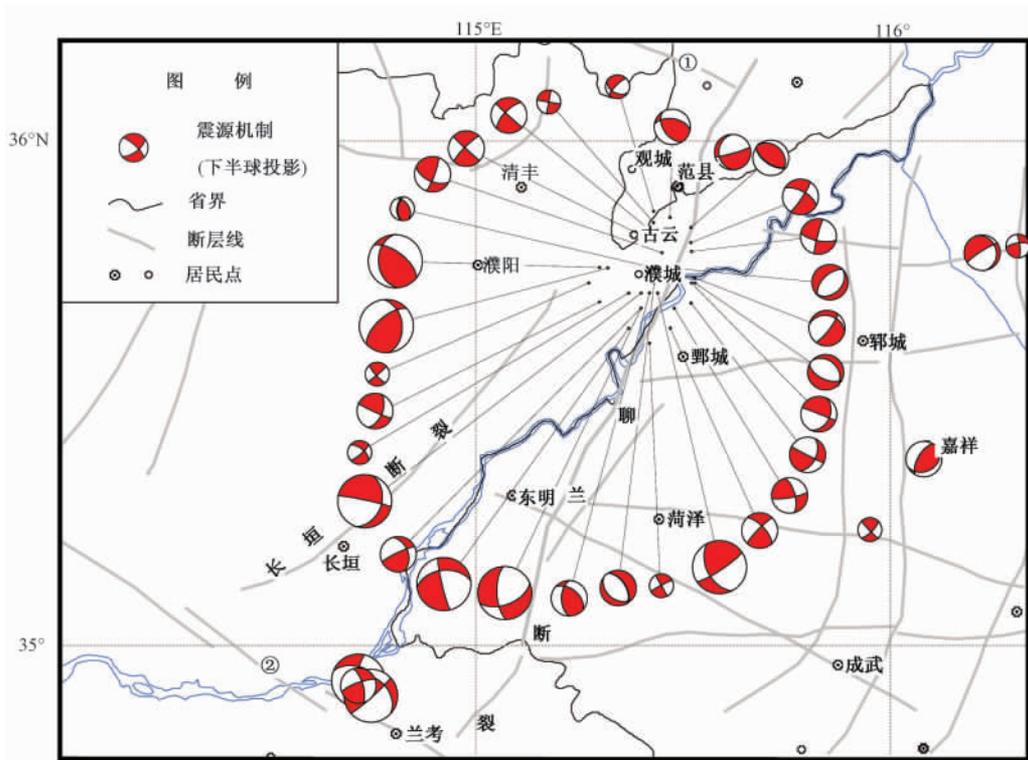


图 8 鲁豫交界地区小震震源机制分布图

①磁县-大名断裂; ②新乡-商丘断裂

局的影响初动符号数相对较少,但仍可以看出初动符号基本呈象限分布。而偏离双力偶模型的地震事件则可能出现单相初动符号占绝大多数,很少或几乎没有相反初动符号的现象(如 2010 年 1 月 31 日四川遂宁 $M_s 5.0$ 地震,震中区 500km 范围内几乎所有台站初动皆向上,仅有震中东南方向少数几个台初动向下④)。

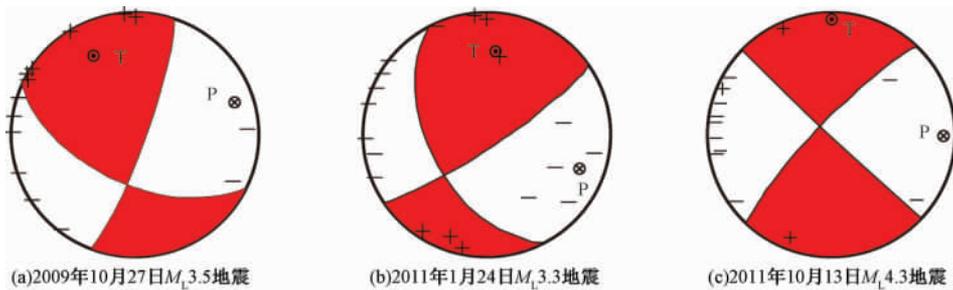


图 9 濮阳小震集中区 3 次中、小地震的初动符号解

④ 易桂喜, 2010, 私人通讯

5 发震机理的讨论

中原油田属复杂断块油田,20 世纪 80 年代后期,在油气储量逐渐降低的情况下,为确保油气产量,油田采取一系列加压注水措施,目前已进入“高含水剩余油”的开发后期(李焱等,2011;郭勇军等,2011);有些区块甚至采出的液体中含水率超过了 90% (胡春锋等,2009;徐德英等,2010)。据菏泽市地震局的调研报告^①,中原油田的采油注水量最高年份达 4500 万吨以上,至 2010 年还保持在 3000 万吨左右。另根据有关资料(安舆等,1991;张国庆等,2002;李国玉等,2002;程秀申,2009)可知,油藏开采深度一般在 1.0 ~ 3.5km,注水深度最大达到甚至超过 4km,已经达到构造地震震源区的深度。资料显示,油田的注水压力已经超过 30MPa(宋志强,2004),并且为了使采油过程增产增效,油田经常进行油水井压裂,在实施大型压裂措施时,井口压力通常达 50 ~ 70MPa,油层套管部位的压力已达 80 ~ 100MPa(陈定柱等,2004),可能已经接近甚至超过该区域岩层的构造应力。在如此大的注水量以及注水压力的背景下,我们对比中原油田石油开采量、注水量以及注采液量差与濮阳集中区小震年频次时(图 10),却没有发现小震活动与油田采油作业之间存在类似前人研究得到的相对一致的对应关系(程式等,1992;许华明等,2008),反而小震活动频次的升高明显地滞后于油田注水量的变化。由图 10 可见,在 1994 年前后,油田的注水量以及注采液的差达到最大,而小震活动在 1996 年以后开始逐渐升高,并且在 1999 ~ 2001 年出现了小震活动的明显减弱。

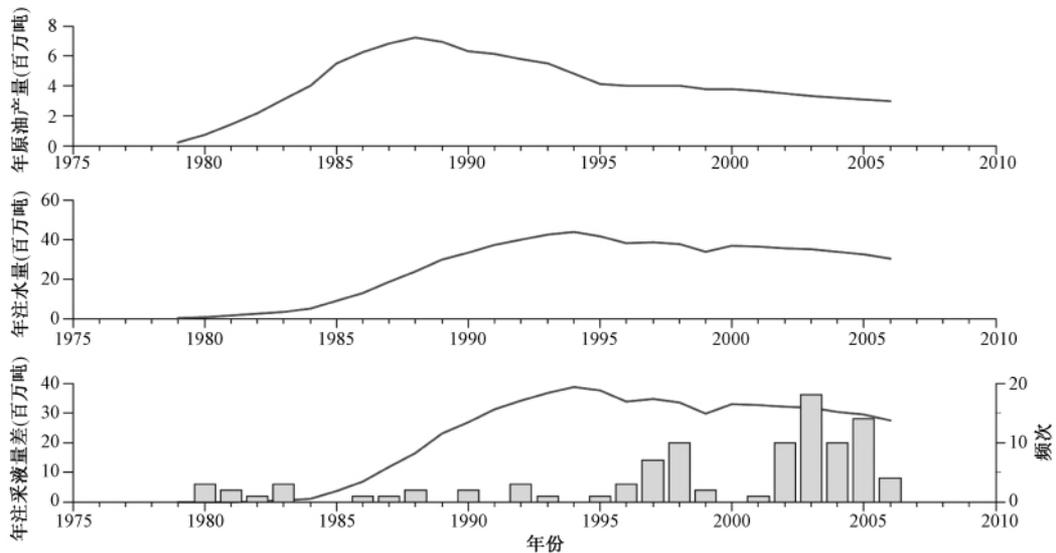


图 10 中原油田石油开采量与注水量与濮阳集中区小震年频次对比图(据文献^①中有关附图重绘)

油田地质资料表明,濮阳小震集中区所在的东濮凹陷北部的文留、濮城、卫城等油田的储油层为下第三系沙河街组,主要是盐湖沉积带,岩层成分主要是泥岩、灰岩以及达到成分和结构中成熟度的砂岩,并且发育了面积广、厚度大的盐膏层(刘伟等,2010)。根据研究,这样的岩体构成在油藏区的高温高压下,极易产生塑性流变蠕变,也因此对油水井的套

管产生挤压变形和剪切作用,油田方面的相关研究结果(陈定柱等,2004;杨全疆等,2004;刘伟等,2010)也证实了这一现象(濮城油田超过40%的注水井套管损坏)。因此我们认为,正是由于这样特殊的构造,使这一层位无法积累大的构造应力,所以很少有天然地震发生,我们前面给出的小震精定位结果中,5km以上的深度尤其是2~4km深度范围发生的小震很少(图6(b))的现象与这一现象恰好吻合。

油田地质方面的资料还表明,濮城油田属于低渗透砂岩油藏,层间渗透非均质性较弱(尹太举等,2004)。周斌等(2010)以紫坪铺水库为例,通过数值模拟研究了库水加卸载及渗流过程对水库诱发地震活动的动态响应关系。研究发现,以孔隙介质为载体的流体渗流对岩体变形和摩擦性质存在影响,断裂渗透结构对孔隙压力变化下断裂的力学响应具有重要的影响,并且水库诱发地震的时空演化与岩层强度和渗透条件存在密切关系。对于濮阳小震集中区,由于油藏层位的岩体渗透条件差,因此在长期的加压注水后,流体才可能渗流到更深的层位,逐渐地作用于隔水的基底断裂(即聊兰断裂),对断层活动产生润滑和触发作用,并在构造应力的作用下,导致中小地震活动增加。

另外还有一个能够对比说明情况的事实,1983年11月7日菏泽 $M_s5.9$ 地震前,在聊兰断裂东侧、近EW向的菏泽断裂西端直径不到40km的范围内也曾出现小震密集集中活动的现象(图略),当时被称为“菏泽地震巢”(赵兴兰等,1984)。由于这一区位不存在采油作业的影响,因此更可能是该区特殊地质构造条件以及区域应力作用的结果。虽然“菏泽地震巢”与当前濮阳小震集中区分别位于聊兰断裂两侧,但二者间距仅约50km,构造和应力背景应当差别不明显,所以濮阳小震集中活动的性质可能与1983年菏泽 $M_s5.9$ 地震前震源区附近的小震丛集活动相类似。

对于前文提出的“同样的采油注水过程,近乎相同的地质构造背景和断层条件,为何文留以北濮城镇周边地区小震集中活动,而胡状集-庆祖集-文留-习城一带则没有小震活动?”的疑问,我们分析认为可能有以下两方面的影响因素:一方面,正如前文所讨论的,可能如图7所示,濮阳小震集中区恰好为1502年濮城 $6\frac{1}{2}$ 地震的破裂区,该区目前存在一定的应力积累,在油田长期高压注水的液体渗流作用下,出现断层活化,以频繁小震的形式释放所积累的应变,而文留以南的断层区段可能在1937年菏泽7级地震中得到了充分的释放,由于离逝时间较短,目前没有应变积累,因此没有小震活动。另一方面,参考漆家福等(2006)与程秀申等(2010)根据地震剖面和理论计算给出的聊兰断裂的主断层面构造等深线,图11给出聊兰断裂的三维断层模型。由该模型可以看出,聊兰断裂的主干断层面在古云-庆祖集的区段内出现了突然下凹的形态,使得断层面在濮城附近显得尤为陡峭,这一形态直观地表现为断层上盘的下部凸出一部分,嵌入到断层的下盘。由于聊兰断裂北段以右行平移滑动为主要运动方向(李鹏举等,1994),在NEE向的主压应力作用下(樊满仓,2008),由于断层的这一特殊形态,使得断层在濮城附近受到的应力最为集中,因此小震活动也主要集中在断层的该部位。

6 结论

综上所述,我们通过对濮阳小震集中区的小震进行双差精定位和震源机制求解,结合地质构造分析,对该区小震活动的发震机理得到以下认识:

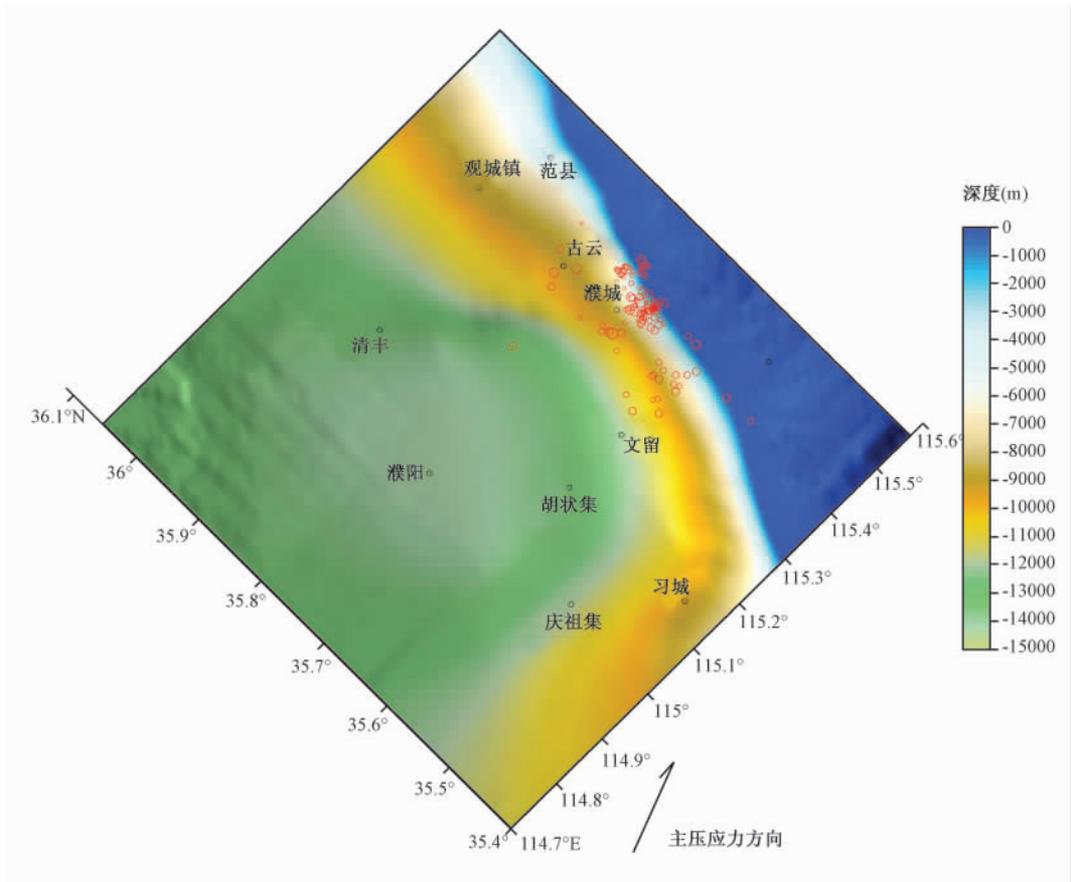


图 11 聊兰断裂(局部)三维断层模型及濮阳小震集中区小震震中分布图

(1) 小震震源深度优势分布在 7 ~ 10km 之间, 5km 以上的深度发生的小震很少, 这与当地构造环境相吻合。

(2) 震源深度剖面显示小震震源的分布与聊兰断裂的断层线形态较为一致, 基本反映了断层的倾角变化和产状, 说明该区小震活动主要与聊兰断裂有关。

(3) 小震活动在空间上主要集中在濮城附近约 20km 的范围, 与油田采油区分布范围存在差异。

(4) 双力偶的震源机制可以较好地解释观测波形; 小震震源机制以走滑型为主, 初动符号呈象限分布; 未发现地震辐射花样的畸变。

(5) 濮阳小震集中区小震活动与油田注水量或注采液量差等无直接对应关系; 采油注水对断层活动可能存在某种程度的诱发因素, 但不是小震发生的直接原因, 小震丛集活动可能与长期加压注水后液体渗流作用对断层产生润滑和触发的因素有关。

(6) 小震集中于濮城镇周边的活动现象可能与断层构造形态有关。

致谢: 中国地震局地震预测研究所邵志刚博士给予了细致的指导, 中国地震台网中心蒋海昆研究员以及审稿专家提出了宝贵的修改意见和建议, 山东省地震预报研究中心鲁西震情跟踪组的同志提供了很多

帮助,本文还得益于菏泽市地震局所做的大量前期调研工作;本项工作也得到了中国地震局预报处马宏生博士的支持和鼓励,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- 安爽、郝钧,1991,东濮凹陷构造特征与油气,见:中原石油勘探局,东濮凹陷及邻区构造特征与油气关系研究,79~89,北京:石油工业出版社。
- 陈定柱、张雪峰、计曙东,2004,濮城油田注水井套管损坏机理分析与研究,内蒙古石油化工,30(6),109~111。
- 程式、刘文泰,1992,中国注水诱发地震的又一个实例,地震,12(1),63~66。
- 程秀申,2009,河南东濮凹陷构造样式分析,现代地质,23(3),414~422。
- 程秀申、陈发景、漆家福等,2010,东濮凹陷伸展连锁断层系统及其演化作用,现代地质,24(4),735~743。
- 邓起东、徐锡伟、于贵华,1994,中国大陆活动断裂的分区特征及其成因,见:中国地震学会地震地质专业委员会,中国活动断层研究,1~14,北京:地震出版社。
- 刁桂苓、张德元、赵根模,1982,任丘油田注水地震的初步研究,西北地震学报,4(3),89~95。
- 刁守中、蒋海昆、徐学炎,1990,山东胜利油田角07井注水地震序列的演化及其机制,地震学报,12(4),399~406。
- 樊满仓,2008,东濮凹陷北东向断裂系形成机制与油气关系,中国石油勘探,13(6),26~32。
- 房立华、吴建平、张天中等,2011,2011年云南盈江 M_s 5.8地震及其余震序列重定位,地震学报,33(2),262~267。
- 胡长和、许坤福,1991,1937年菏泽地震,1~176,北京:地震出版社。
- 胡春锋、郑可、王德龙,2009,濮城油田低渗油藏高含水后期剩余油分布研究,石油天然气学报(江汉石油学院学报),31(5),345~348。
- 胡凤英、雷栋、胡修齐等,2005,东濮拗陷地区地震震相特征分析,山西地震,29(4),21~22,39。
- 华卫、刘杰、郑斯华等,2006,2003年云南大姚6.2、6.1级地震序列特征分析及地震触发研究,中国地震,22(1),10~23。
- 黄媛、吴建平、张天中等,2008,汶川8.0级大地震及其余震序列重定位研究,中国科学(D辑),38(10),1242~1249。
- 江娃利,2006,有关华北平原强震发震构造问题的讨论,中国地震,22(2),135~141。
- 李国玉、吕鸣岗、赵俭成等,2002,中国含油气盆地图集(第2版),58~59,北京:石油工业出版社。
- 李鹏举、李德生,1994,东濮凹陷拉张构造研究,石油勘探与开发,21(4),6~9,29。
- 李行船、郭飏、曲国胜等,2007,山东东营杜邦1井注水诱发破裂活动分析,地震学报,29(3),274~284。
- 李焱、程刚,2011,濮城油田沙一段储层特征研究,石油天然气学报(江汉石油学院学报),33(9),47~51。
- 刘伟、李红南、安天下,2010,中原油田高压注水诱发的油水井套管损坏原因分析,中国地质灾害与防治学报,21(2),94~99。
- 吕子强、肖兰喜、许萍,2008,濮阳地震集中区地震精定位及其预测意义,华北地震科学,26(2),12~15。
- 国家地震局地震研究所,1984,中国诱发地震,1~202,北京:地震出版社。
- 郭勇军、李霞、李军等,2011,濮城油田高含水油藏开发后期稳产增产措施,工程管理,30(4),82~84。
- 漆家福、王德仁、陈书平等,2006,兰聊断层的几何学、运动学特征对东濮凹陷构造样式的影响,石油与天然气地质,27(4),451~459。
- 阮怀宁,1993,东明凹陷地质构造力学解析,河海大学学报,21(1),24~30。
- 阮祥、程万正、张永久等,2008,四川长宁盐矿井注水诱发地震研究,中国地震,24(3),226~234。
- 宋志强,2004,濮城油田低渗透砂岩油藏开发主要机理及合理井距分析,断块油气田,11(1),50~51,57。
- 涂毅敏、陈运泰,2002,德国大陆超深钻井注水诱发地震的精确定位,地震学报,24(6),587~598。
- 王长在、吴建平、房立华等,2011,2009年姚安地震序列定位及震源区三维P波速度结构研究,地震学报,33(2),123~133。
- 王海涛、李志海、赵翠萍等,2007,新疆北天山地区 $M_s \geq 2.0$ 地震震源参数的重新测定,中国地震,23(1),47~55。
- 王婧韫、宋慧利、王正斌等,2004,东濮凹陷断裂体系及其意义,石油地球物理勘探,39(6),724~729。
- 徐德英、胡望水、熊平等,2010,濮城油田沙一段储层非均质性模型研究,石油天然气学报(江汉石油学院学报),32(1),47~50。
- 许华明、曲国胜、李行船等,2008,注水诱发地震的成因及影响因素探讨,西北地震学报,30(3),221~226。

- 杨全疆、宋志强、刘平等, 2004, 濮城油田套管损坏机理与防治方法研究, 河南石油, **18**(4), 60~62。
- 杨智娟、陈运泰、郑月军等, 2002, 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用, 中国科学(D辑), **33**(B04), 129~134。
- 尹太举、陈昊、李中超等, 2004, 濮城沙三中6~10特低渗油气藏非均质性研究, 天然气地球科学, **15**(5), 471~476。
- 张德元、刘书文、张耀峰, 1990, 华北油田任845井注水诱发地震特征与地震机制探讨, 地震学刊, **10**(1), 65~70。
- 张国庆、李令喜、李效蕊, 2002, 东濮凹陷断层封墙模式探讨, 断块油气田, **9**(5), 16~18。
- 张克鑫、漆家福、赵衍彬等, 2007, 新生代东濮凹陷构造特征及其演化, 新疆石油地质, **28**(6), 714~717。
- 张致伟、程万正、梁明剑等, 2012, 四川自贡-隆昌地区注水诱发地震研究, 地球物理学报, **55**(5), 1635~1645。
- 赵根模、张德元, 1995, 注水诱发地震研究, 1~151, 北京: 地震出版社。
- 赵兴兰、魏光兴, 1984, 聊城-兰考断裂带地震活动图象, 华北地震科学, **2**(2), 8~13。
- 周斌、薛世峰、邓志辉等, 2010, 水库诱发地震时空演化与库水加卸载及渗透过程的关系——以紫坪铺水库为例, 地球物理学报, **53**(11), 2651~2670。
- Ake J, Mahrer K, O'Connell D, et al, 2005, Deep-injection and closely monitored induced seismicity at Paradox Valley, Colorado, Bull Seis Soc Am, **95**(2), 664~683.
- Baisch S, Bohnhoff M, Ceranna L, et al, 2002, Probing the crust to 9-km depth: fluid-injection experiments and induced seismicity at the KTB superdeep drilling hole, Germany, Bull Seis Soc Am, **92**(6), 2369~2380.
- Cuenot N, Charléty J, Dorbath L, et al, 2006, Faulting mechanisms and stress regime at the European HDR site of Soultz-sous-Forêts, France Geothermics, **35**(5~6), 561~575.
- Dahm T, Manthei G, Eisenblätter J, 1999, Automated moment tensor inversion to estimate source mechanisms of hydraulically induced micro-seismicity in salt rock, Tectonophysics, **306**(1), 1~17.
- Fischer T, Guest A, 2011, Shear and tensile earthquakes caused by fluid injection, Geophys Res Lett, **38**, L05307, 1~4.
- Jost M L, Bübelberg T, Jost Ö, et al, 1998, Source parameters of injection-induced micro-earthquakes at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany, Bull Seis Soc Am, **88**(3), 815~832.
- Miller A, Foulger G, Julian B, 1998, Non-double-couple earthquakes 2: observations, Rev Geophys, **36**(4), 551~568.
- Mohammadioun B, Serva L, 2001, Stress drop, slip type, earthquake magnitude and seismic hazard, Bull Seis Soc Am, **91**(4), 694~707.
- Ohtake M, 1974, Seismic activity induced by water injection at Matsushiro, Japan J Phys Earth, **22**, 163~176.
- Rutledge J T, Phillips W S, Schuessler B K, 1998, Reservoir characterization using oil-production-induced microseismicity, Clinton County, Kentucky, Tectonophysics, **289**(1~3), 129~152.
- Shapiro S A, Kummerow J, Dinske C, et al, 2006, Fluid induced seismicity guided by a continental fault: Injection experiment of 2004/2005 at the German Deep Drilling Site (KTB), Geophys Res Lett, **33**(L01309), 1~4.
- Šílený J, Hill D P, Eisner L, et al, 2009, Non-double-couple mechanisms of micro-earthquakes induced by hydraulic fracturing, J Geophys Res, **114**, (B08307), 1~15.
- Sokos E N, Zahradnik J, 2008, ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data, Computers & Geosciences, **34**(8), 967~977.
- Trifu C, Shumila V, 2002, Reliability of seismic moment tensor inversions for induced micro seismicity at Kidd Mine, Ontario, Pure Appl Geophys, **159**(1~3), 145~164.
- Vavryčuk V, 2002, None-double-couple earthquake of 1997 January in West Bohemia, Czech Republic: evidence of tensile faulting, Geophys J Int, **149**(2), 364~373.

Analyses and discussion on mechanism of clustered microearthquakes in Puyang, Henan Province

Zheng Jianchang¹⁾ Lv Ziqiang¹⁾ Xu Ping¹⁾ Chen Yahong²⁾ Zhao Jinhua¹⁾

1) Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China

2) Earthquake Administration of Heze City, Heze 274000, Shandong, China

Abstract Based on microearthquakes fine relocations and focal mechanisms, the paper analyses the causes of clustered microseismicity in Puyang, Henan. The relocated results given by hypoDD shows that the hypocenters of most microearthquakes are situated at the trunk fault of Liaocheng-Lankao fault zone, and its distributions accord with the fault's attitude. Focal mechanisms of 5 events with $M_L \geq 3.5$ show that observed waveforms can be well explained by the double couple model. There are mainly strike-slip mechanisms in smaller events, with quadrantal polarities. On the basis of relative materials on geology and tectonic backgrounds of oilfield, the paper discusses inductive relationship between fluid injection for oil-production and microseismicity in this area.

Key words: HypoDD Focal mechanism Injection induced earthquake 3D fault model