

盛书中,万永革,黄骥超等. 2015. 应用综合震源机制解法推断鄂尔多斯块体周缘现今地壳应力场的初步结果. 地球物理学报, 58(2):436-452, doi:10. 6038/cjg20150208.

Sheng S Z, Wan Y G, Huang J C, et al. 2015. Present tectonic stress field in the Circum-Ordos region deduced from composite focal mechanism method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(2):436-452, doi:10. 6038/cjg20150208.

应用综合震源机制解法推断鄂尔多斯块体周缘现今地壳应力场的初步结果

盛书中^{1, 2}, 万永革^{2, 1*}, 黄骥超³, 卜玉菲⁴, 李祥²

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 防灾科技学院, 河北三河 065201

3 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000

4 江苏省地震局南京基准地震台, 南京 210014

摘要 利用 2007 年 8 月 1 日至 2013 年 7 月 21 日发生在鄂尔多斯块体周缘的 8499 个地震的 49844 个 P 波初动符号资料, 应用综合震源机制解法获得了鄂尔多斯块体周缘 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的精细地壳应力场, 所得应力场结果基本上覆盖了整个鄂尔多斯周缘地区. 研究结果表明鄂尔多斯周缘地壳应力场具有以下特征: (1) 在环绕鄂尔多斯周缘的银川—吉兰泰断陷带、河套断陷带、岱海断陷带、山西断陷带和渭河断陷带内, 综合震源机制解结果以正断层型为主, 且综合震源机制解节面走向大体与控制断陷带边界的主要断裂走向相一致, 与鄂尔多斯周缘断陷带现今的拉张状态相一致. (2) 在鄂尔多斯西南缘, 综合震源机制解类型主要为逆冲、逆冲走滑和走滑型, 反映了鄂尔多斯块体在西南缘受到青藏高原北东向挤压作用. 鄂尔多斯西南缘的应力场的主压应力方向在远处为东向, 源自于青藏高原向东北挤压作用, 靠近鄂尔多斯块体表现为北东—南西向. (3) P 轴方位在局部地区变化较大, 但总体呈现规律性变化, P 轴方位在鄂尔多斯块体西缘, 从南向北, 主压应力轴方位更加偏北; 在其北缘, 由西向东, 主压应力轴方位更加偏东. 在其南缘和东缘, 主压应力轴方位变化不大, 大体上平行于控制各断陷带主要断裂走向. P 轴倾角在西南缘为近水平, 在其周缘各盆地内 P 轴倾角近直立. (4) T 轴方位总体表现为北西—南东向; 在鄂尔多斯周缘各断陷带内, T 轴走向大体与控制断陷带主要断裂走向以及断陷盆地走向相垂直. (5) 鄂尔多斯块体在其西南角受到来自青藏高原的北东向挤压和其东北角深部物质上涌形成的北西—南东向拉张力联合作用, 上述作用使得鄂尔多斯块体周缘地区除西南区为挤压区外, 其余区域均为剪切拉张区, 与先前研究认为鄂尔多斯周缘地区处于引张应力场作用相符合, 较好地解释了环鄂尔多斯周缘的断陷盆地构造, 亦符合鄂尔多斯块体东西两侧的右旋剪切拉张带以及南北两侧的左旋剪切拉张带的认识.

关键词 应力场; 综合震源机制解; P 波初动; 鄂尔多斯块体

doi:10. 6038/cjg20150208

中图分类号 P315

收稿日期 2014-06-11, 2014-10-31 收修定稿

Present tectonic stress field in the Circum-Ordos region deduced from composite focal mechanism method

SHENG Shu-Zhong^{1, 2}, WAN Yong-Ge^{2, 1*}, HUANG Ji-Chao³, BU Yu-Fei⁴, LI Xiang²

1 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2 Institute of Disaster Prevention, Sanhe Hebei 065201, China

3 Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

4 Nanjing Seismic Station, Nanjing 210014, China

Abstract With more and more densely seismic stations deployed, a large number of P wave first

基金项目 地震行业专项(201208009, 200808053)、中央高校基本科研业务专项资金(创新项目团队资助计划)(ZY20110101)和国家科技支撑计划项目(2012BAK19B03-4)共同资助.

作者简介 盛书中, 男, 1982 年生, 安徽庐江人, 在读博士研究生, 主要从事构造应力场等方面的研究. E-mail: ssz@cea-igpp. ac. cn

* **通讯作者** 万永革, 男, 1967 年生, 研究员, 主要从事地震学与地球动力学, 构造应力场等方面研究工作. E-mail: wanyg217217@vip. sina. com

motion data are observed, which provides us an opportunity to further study the tectonic stress field. In this paper, by using the 49844 P wave first motion polarity data from 8499 earthquakes, which occurred in and around the Ordos block from August 1, 2007 to July 21, 2013, we obtained the precise and detailed stress field in the study area. The composite focal mechanism method was used in this study. By fitting the focal mechanism radiation pattern with P wave polarity data from a large number of earthquakes, this method can obtain the composite focal mechanism in specific grid, and P , B , T axes can be regarded as the principal stress axes of the tectonic stress field. The grid search method is used to fit the focal mechanism radiation pattern, the focal mechanism which has the minimum contradictory ratio was regarded as the optimal solution. The inconsistent ratio is the ratio of the number of P wave first motion polarity which is inconsistent with the focal mechanism and the total number of P wave first motion polarity data, which is weighted by the distance of the earthquake epicenter to the grid point.

The study results show that the stress field has the following characteristics: First, in the rift zone of the Yinchuan-Jilantai, Hetao, Daihai, Shanxi, and Weihe around the Ordos block, the main types of composite focal mechanism are normal types, and the strike of the nodal planes is consistent with the strike of the main fault which controls the boundary of the rift zone, that is, in accord with the extension regime in the rift zone around the Ordos block. Second, the main types of the composite focal mechanism are thrust, thrust-strike-slip and strike-slip types in the southwest boundary of the Ordos block, which reflects that the Ordos block is subjected to the northeastward squeezing of the Qinghai-Tibetan plateau. The principal compressive stress direction is eastward in the distance from the southwest boundary of Ordos block, that may derived from the northeastward squeezing of the Qinghai-Tibetan plateau, the principal compressive stress direction turns to NE-SW direction when near the Ordos block. Third, the P -axis azimuth shows generally regular changes except in some local areas. From south to north, the P -axis azimuth becomes more to the north direction in the west boundary of the Ordos block. From west to east, the P -axis turns more to the east direction in the north boundary of the Ordos block. In the south and east boundary of the Ordos block, the P -axis azimuth has small change and is parallel to the main fault's strike which controls the boundary of the rift zone. The dip angle of the P -axis is nearly horizontal in the southwest boundary of the Ordos block, and nearly vertical in the basins around the Ordos block. Fourth, the T -axis azimuth is NW-SE overall. The T -axis is generally perpendicular to the strike of the main fault which controls the boundary of the rift zone and the strike of the basin in the basins around the Ordos block. Fifth, under the NE pushing force from the Qinghai-Tibetan plateau and the NW-SE extension caused by the uplifting of the deep substance, the regions around the Ordos block are shear zones with extensional components, except for the compressional region in the southwest of Ordos-block; these results are consistent with the previous studies which suggest that the Circum-Ordos block is in extensional stress field, also better explain the fault basins surrounding the Ordos block, also accord with the formation of right-lateral shear zones with extension components in its western and eastern boundary and left-lateral shear zones with extensional components in its southern and northern boundary. Overall, we obtained the stress field around the Ordos block, and its general characteristics are consistent with the results of previous study, our results are more consistent with the basin structure around the Ordos block. In this study we focus on the general characteristics of our results. In the further study, we will pay more attention on the inconsistency of our study with the previous study, try to find out the reason and give a reasonable explanation;

and pay more attention on the phenomenon of sudden changes in the direction of the stress axis, try to find whether it caused by the inhomogeneity of stress field, or the complex geological structure, or other reasons.

Keywords Stress field; Composite focal mechanism; P wave first motion polarity; Ordos block

1 引言

鄂尔多斯块体是一个稳定的块体,位于南北地震带北段东侧、又处于华北、华南和青藏高原东北缘三个陆块的汇聚部位,块体内部地震活动频度和强度均低,但其周边地震活动强烈.鄂尔多斯周缘的活断层在我国大陆内部自成一个体系,是一组十分具有活动特色的正断层系,沿此带历史上发生过5次8级及8级以上强震,约占我国历史上有记载的8级及8级以上强震的四分之一(邓起东和尤惠川,1985;国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组,1988).由于鄂尔多斯块体地理位置及地震活动的特殊性,有关于鄂尔多斯形成及其演化和形变动力学研究,一直以来都是地学研究的热点问题,有些学者强调华南和华北大型走滑断裂拉分作用是形成山西断陷带的重要原因(Tapponnier et al., 1982, 1986; Peltzer et al., 1985),但该模型很难解释近东西向展布的渭河和河套盆地的形成.有的学者认为鄂尔多斯周缘新生代断陷盆地与华北东部地区盆地一起,其形成与太平洋板块向亚洲大陆俯冲产生的弧后扩张有关,属于弧后盆地(Uyeda and Kanamori, 1979; Tian et al., 1992; Northrup et al., 1995).有的学者认为鄂尔多斯块体具有逆时针旋转运动(苏刚, 1984; 徐锡伟等, 1994; 邵辉成和苏刚, 1999; 张岳桥等, 2006),也有少数学者认为其存在顺时针旋转(张希等, 2002).“挤压剪切模式”认为地块西南侧青藏块体北东向的挤压和鄂尔多斯块体本身的隆升是决定鄂尔多斯地块新生代构造活动的两大动力,并认为鄂尔多斯块体本身不存在旋转问题(邓起东和尤惠川, 1985; 邓起东等, 1999).陈小斌等(2005)提出了鄂尔多斯块体与其周缘块体相互作用的“挤推阻碍模式”.本研究将借助于地震波资料揭示鄂尔多斯块体周缘现今地壳应力场的空间分布,为进一步研究其周缘现今应力应变状态、地震发震机理等研究提供基础资料.

有关鄂尔多斯块体周缘应力场研究,已有许多研究成果.有的研究工作直接针对鄂尔多斯块体周缘的地壳应力场(薛宏运和鄢家全, 1984; 邓起东和

尤惠川, 1985; 邓起东等, 1999; 范俊喜等, 2003),并获得了鄂尔多斯块体周缘地壳应力场的总体特征.

有的研究工作在研究较大区域地壳应力场问题时,其中包含鄂尔多斯块体周缘地区地壳应力场的研究,如关于华北地壳应力场的研究(高名修, 1979; 李钦祖, 1980; 许忠淮等, 1983)、关于东亚地区现今构造应力场研究(许忠淮, 2001)、关于中国大陆及邻区应力场的研究(鄢家全等, 1979; 张东宁和高龙生, 1989; 汪素云等, 1996; 杜兴信和邵辉成, 1999; 谢富仁等, 2004; 徐纪人和赵志新, 2006; 朱守彪和石耀霖, 2006; 徐纪人等, 2008; Wan, 2010; 范桃园等, 2012)等均含有鄂尔多斯地区地壳应力场的研究.

鄂尔多斯块体周缘地质构造复杂,地震活跃,故也有大量关于鄂尔多斯周缘某个局部地区应力场研究工作.有许多学者对宁夏地区应力场进行了研究(陈爱玲等, 1981; 李孟奎和赵知军, 1981; 李孟奎和赵知军, 1986; 赵知军和刘秀景, 1990; 赵知军等, 2002),获得了宁夏地区较详细的应力场特征.许多研究者利用地球物理和地震观测等手段,对山西地区应力场进行了较深入的研究(梁海庆等, 1986; 胡惠民, 1987; 成尔林和张美芳, 1990; 刘巍等, 1993, 1994, 1995, 1996; 安美建和李方全, 1998).姜家兰(1991)利用地震震源机制解资料(其中包括小地震综合断层面解)给出了陕西及邻近地区现代构造应力场,研究结果表明该区域应力场从北向南存在差异性.谢富仁等(2000)通过断层滑动资料反演构造应力场,确定了海原、六盘山断裂带至银川断陷的应力场.

关于鄂尔多斯块体周缘的地壳应力场研究,显示出该区域应力场的复杂性,总体上获得了较为一致的认识,即本区域应力场为北东—北东东向主压应力和北西—北北西向拉张应力;主压应力方位,自北向南,自西向东呈现出规律性变化,这种应力场格局与鄂尔多斯块体同时兼受印度板块和太平洋板块挤压并以前者为主有关(薛宏运和鄢家全, 1984; 李孟奎, 1985; 胡惠民, 1989; 邓起东等, 1999; 范俊喜等, 2003; 徐黎明等, 2006).但上述研究中,由于受到资料有限性的限制,给出的应力场结果不够精细,不能详细地反映地质构造相对应的构造应力场的变

化;随着地震观测台网的加密和地震资料的丰富,为鄂尔多斯周缘地壳精细应力场的深入研究提供了机会.本研究采用了近期发生的大量地震的 P 波初动资料,以期得到更为精细的地壳应力场,为鄂尔多斯地块周缘地壳形变的动力学机制、地震孕育机理等研究提供基础资料.

2 方法、资料和地壳速度模型

Aki(1966)首先提出采用大量小震 P 波初动资料推测应力场方向的方法,该方法被称为求解应力场的综合震源机制解法.该方法的优点是可以利用大量不能单独确定震源机制解的小地震 P 波初动极性数据推断应力场方向,因此,得到了较为广泛的应用(李钦祖等,1973;许忠淮等,1979,1983,1987,1989;薛宏运和鄢家全,1984;成尔林和张美芳,1990;姜家兰,1991;徐鸣洁等,1996;Wan,2010;卜玉菲等,2013;盛书中等,2013).该方法还被用于分析区域应力场的变化过程,已有不少学者在这方面做了许多研究工作(华祥文,1980;成尔林等,1982;阚荣举等,1983).李钦祖等(1973)根据该方法求得了红山台和沙城台两个区域的应力场.许忠淮等(1983)进一步提出了采用研究区域的多个地震和多个台站求解区域应力场的方法,并采用合成数据对此方法进行了严格测试,验证了用该方法可以获得地壳应力场.薛宏运和鄢家全(1984)将该方法用于鄂尔多斯地块周围现代地壳应力场的确定.汪素云和许忠淮(1985)用该方法给出了中国东部大陆的构造应力场特征.万永革等(2011)利用台湾自 1991—2007 年间观测的 P 波初动资料给出了台湾地区地壳三维应力结构的初步结果.随着地震观测台网的密集,地震监测能力的增强,求解应力场的综合震源机制解法将有着良好的应用前景.

本研究中使用了研究区内 2007 年 8 月 1 日—2013 年 7 月 21 日鄂尔多斯块体周缘发生的 8499 个地震的 49844 个 P 波初动符号,其中 2007 年 8 月 1 日—2011 年 8 月 31 日的 P 波初动资料为项目组由中国地震局地球物理研究所数据备份中心(郑秀芬等,2009)申请数据后自行拾取的,2011 年 8 月 31 日之后的 P 波初动极性资料由中国地震台网中心震相报告中读取,研究中使用的地震震中分布情况见图 1.

我们对所用的地震震级进行统计,不同震级档的地震个数及其比例见图 2 和表 1.可见该段时间

内,该区域 2 级以下地震约占 66%, b 值一般情况下在一个地区是较为稳定的,也就是说我们所统计的震级分布,大体上可以视为该区域长期的震级分布情况.由该区域地震震级分布可见,在未考虑完整性震级的情况下, $M_{2.0}$ 级以下小震数目占了六成以上.一般情况下小地震难以给出准确的震源机制解,为了充分利用该区域发生的大量小震资料来约束应力场方向,综合震源机制解法无疑是最好的选择,故本研究应用 P 波初动综合震源机制解法研究鄂尔多斯周缘地区地壳应力场方向.

表 1 鄂尔多斯周缘地震震级分布统计表
(2007-8-1—2013-7-21, $M > 0$)

Table 1 The earthquake magnitude statistic table of Ordos and its adjacent area

震级	(0—1]	(1—2]	(2—3]	(3—4]	(4—5]	(5—6]	$M_L > 6.0$
地震数量	331	5294	2460	375	32	4	0
百分比	3.9%	62.31%	28.95%	4.41%	0.38%	0.04%	0

本研究中应力场计算仿照万永革等(2011)的应力场计算方法,将研究区域(经纬度范围分别为 104°E — 116°E , 33°N — 42°N)划分为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的二维网格,根据网格点选取周围地震台站上观测到的 P 波初动符号计算每个网格点的应力场.由于每个地震距离网格点的距离不同,对所计算的网格点应力场方向提供的约束也不一样,因此我们根据其于网格点的距离给予不同地震 P 波初动符号不同权重.每个地震的 P 波初动符号权重 W 仿照 Shen 等(1996)的大地测量数据计算应变的方式求取:

$$W = e^{-r^2/D^2}, \quad (1)$$

其中, D 为距离衰减常数; r 为折合距离,其值按式(2)计算.距离衰减常数 D 的选取直接影响到距离计算网格点不同距离地震 P 波初动符号的权重,从而影响到各网格点应力场计算结果,同时, D 的选取对应应力场计算结果也起到一定的平滑作用.网格点应力场计算时,如果 D 取值较小,网格较大,意味着仅考虑距离网格点较近地震的 P 波初动符号,网格点附近网格内地震 P 波初动符号没有考虑或权重较小,所得各个网格点间应力场计算结果相对较为独立;反之,如果 D 取值较大,网格较小,意味着网格点附近网格中地震的 P 波初动符号也有一定的权重,那么所得各个网格点间应力场则相对较为平滑,即周围网格点的地震 P 波初动对其应力场计算存在约束.在本研究中考虑以下两个方面:一、对各

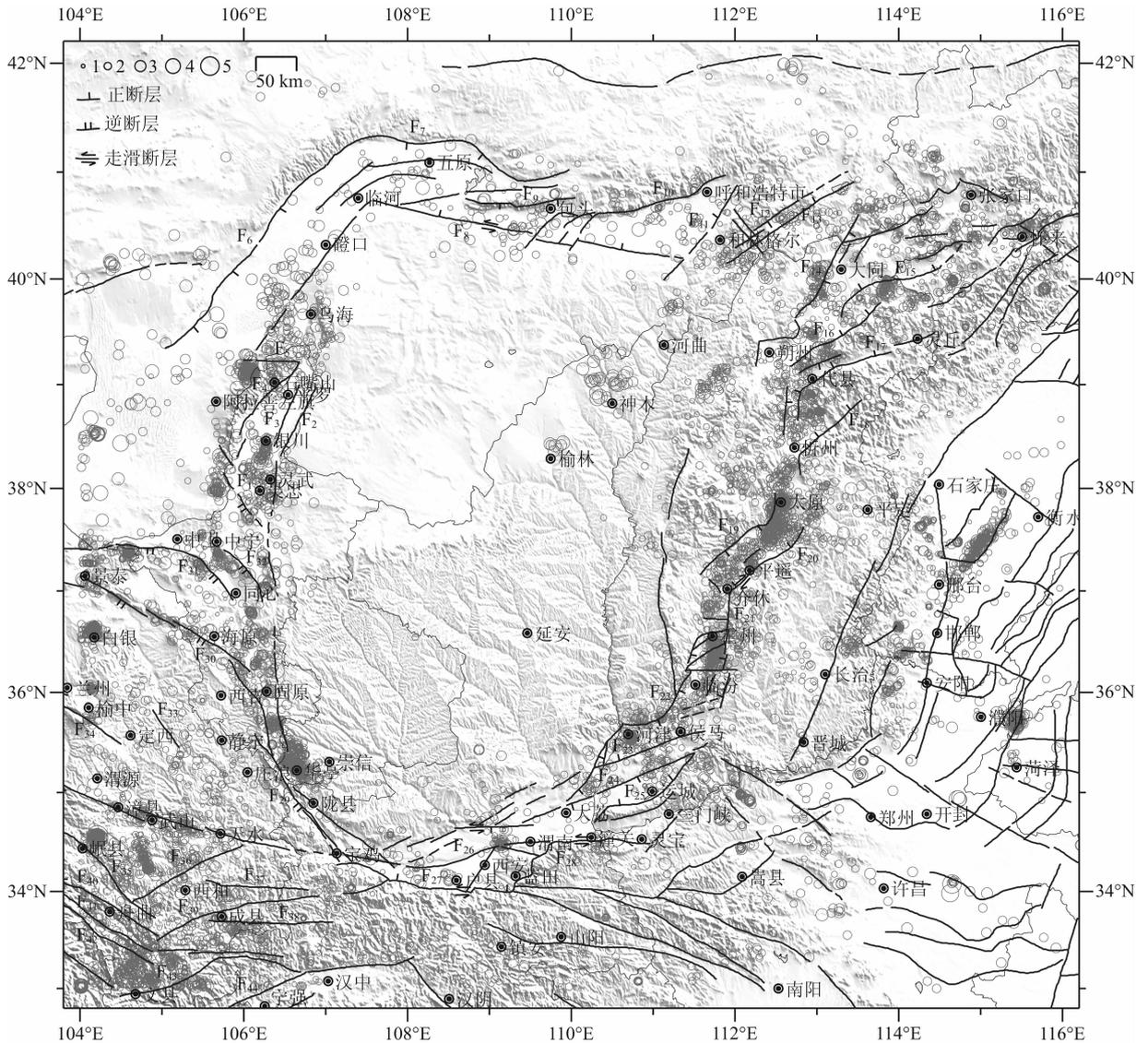


图 1 地震震中及断层分布图

圆表示震中位置,黑线表示断层。F₁ 牛首山北麓断裂;F₂ 黄河断裂;F₃ 银川—平罗断裂;F₄ 贺兰山东麓断裂带;F₅ 正谊关断裂;F₆ 狼山—巴音乌拉山东麓断裂;F₇ 色尔腾山山前断裂;F₈ 鄂尔多斯北缘断裂;F₉ 乌拉山山前断裂;F₁₀ 大青山山前断裂;F₁₁ 和林格尔断裂;F₁₂ 蛮汉山山前断裂带;F₁₃ 岱海—黄旗海南缘断裂带;F₁₄ 口泉断裂;F₁₅ 桑干河断裂;F₁₆ 恒山北麓断裂;F₁₇ 五台山北麓断裂;F₁₈ 系舟山山前断裂;F₁₉ 交城断裂;F₂₀ 太谷断裂;F₂₁ 霍山断裂;F₂₂ 罗云山山前断裂;F₂₃ 峨眉台地北缘断裂;F₂₄ 临猗断裂;F₂₅ 中条山北麓断裂;F₂₆ 渭河断裂;F₂₇ 秦岭北麓断裂;F₂₈ 华上山前断裂;F₂₉ 六盘山东麓断裂;F₃₀ 南、西华山北麓断裂;F₃₁ 天景山北麓断裂;F₃₂ 烟筒山东麓断裂;F₃₃ 会宁—文岗断裂;F₃₄ 马衙山断裂;F₃₅ 临潭—宕昌断裂;F₃₆ 礼县—罗家堡断裂;F₃₇ 麻河沿断裂;F₃₈ 成县盆地南缘断裂;F₃₉ 成县盆地北缘断裂;F₄₀ 光盖山—迭山北麓断裂;F₄₁ 光盖山—迭山南麓断裂;F₄₂ 迭部—白龙江断裂;F₄₃ 文县断裂;F₄₄ 平武—青川断裂。

Fig. 1 The distribution of earthquake epicenter and seismic fault

Circles represent the epicenter, black lines represent fault. F₁ Niushoushan northern foot fault zone, F₂ Huanghe fault, F₃ Yinchuan-Pingluo fault, F₄ Eastern foot fault zone of Helanshan, F₅ Zhengyiguan fault, F₆ Eastern foot fault of Langshan-Bayinwulashan, F₇ Piedmont fault of Seerteng mountains, F₈ Northern marginal fault of Ordos, F₉ Piedmont fault of Wulashan, F₁₀ Piedmont fault of Daqingshan, F₁₁ Horing fault, F₁₂ Piedmont fault of Manhanshan, F₁₃ Southern marginal fault zone of Daihai-Huangqihai, F₁₄ Kouquan fault, F₁₅ Sanggan River fault, F₁₆ Northern foot fault of Hengshan, F₁₇ Northern foot fault of Wutaishan, F₁₈ Piedmont fault of Xizhoushan, F₁₉ Jiaocheng fault, F₂₀ Taigu fault, F₂₁ Huoshan fault, F₂₂ Piedmont fault of Luoyunshan, F₂₃ Northern marginal fault of Emei platform, F₂₄ Linyi fault, F₂₅ Northern foot fault of Zhongtiaoshan, F₂₆ Weihe fault, F₂₇ Northern foot fault of Qinling, F₂₈ Piedmont fault of Huashan, F₂₉ Eastern foot fault of Liupanshan, F₃₀ Northern foot fault of Nanhuashan and Xihuashan, F₃₁ Northern foot fault of Tianjingshan, F₃₂ Eastern foot fault of Yantongshan, F₃₃ Huining-Wengang fault, F₃₄ Maxianshan fault, F₃₅ Lintan—Dangchang fault, F₃₆ Lixian—Luojiabu fault, F₃₇ Maheyuan fault, F₃₈ Southern boundary fault of Chengxian Basin, F₃₉ Northern boundary fault of Chengxian Basin, F₄₀ Northern foot fault of Guanggaishan - Dieshan, F₄₁ Southern foot fault of Guanggaishan-Dieshan, F₄₂ Diebu-Bailongjiang fault, F₄₃ Wenxian fault, F₄₄ Pingwu-Qingchuan fault.

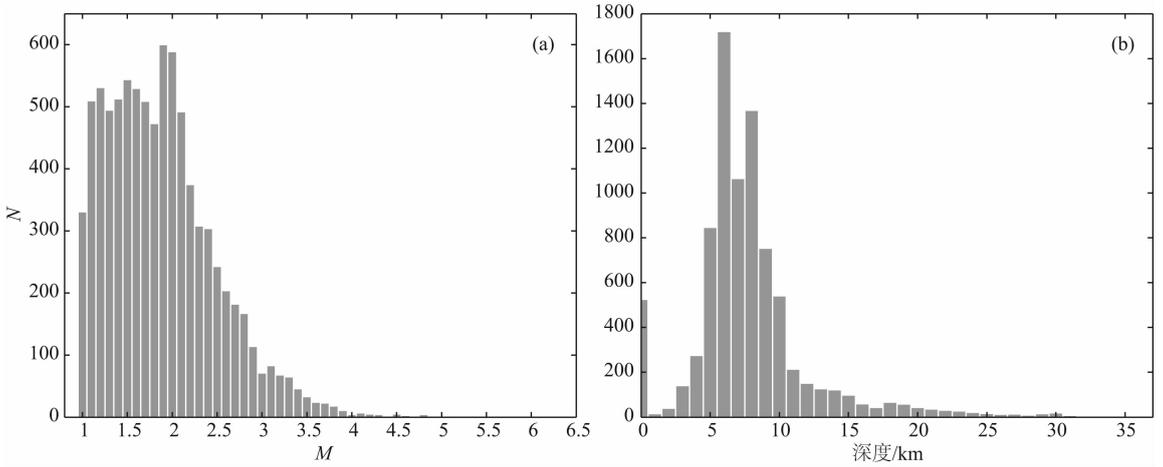


图 2 地震震级(a)和深度(b)分布柱状图

Fig. 2 The histogram of earthquake magnitude (a) and depth (b)

网格点应力场计算结果给予一定的平滑作用;二、部分网格点内地震资料较少,充分利用周边网格点内

地震资料给予约束,以便给出整个环鄂尔多斯块体周缘的地壳应力场,将 D 取为 50 km.

$$r = \sqrt{\left[111.199 \times (\phi - \phi_0) \cos \frac{(\theta + \theta_0)}{2}\right]^2 + \left[111.199 \times (\theta - \theta_0)\right]^2 + (z - z_0)^2}, \quad (2)$$

其中, ϕ 、 θ 、 z 为地震的经度、纬度和深度, ϕ_0 、 θ_0 、 z_0 为网格点的经度、纬度和深度. 我们根据所用地震事件的深度分布情况(见图 2b),将网格点深度 z_0 取为 10 km,即应力场计算结果为地壳内 10 km 处应力场情况. 由 P 波初动符号权重随距离变化关系可知,距网格点折合距离为 41.6 km 的地震的 P 波初动数据只有 50% 的权重,距网格点折合距离为 75.9 km 的地震的 P 波初动数据只有 10% 的权重,而折合距离大于 100 km 地震的 P 波初动数据的权重为 2%. 在本研究中,当距离超过 100 km 时其权重设置为 0 (即未考虑折合距离大于 100 km 的地震). 为了保证应力场的反演质量,我们只选取 P 波初动符号个数大于等于 100 个的网格点进行反演.

为了确定区域内与 P 波初动数据拟合最好的综合震源机制解,进而分析其平均 P 、 T 轴方向,我们采用 $1^\circ \times 1^\circ \times 1^\circ$ 的网格搜索 P 、 B 、 T 轴方位. 每一次搜索给出与综合震源机制解模型不符合的 P 波初动符号数(考虑权重)与总 P 波初动符号个数(考虑权重)之比,我们称之为矛盾比. 选择最小矛盾比所对应的 P 、 B 、 T 轴方位作为该区域的主应力方位. 由于该方法综合了多个地震的 P 波初动数据,得到的综合震源机制解的 P 和 T 轴方位大体可以认为是该研究区域的最大和最小主压应力方位(李钦祖等,1973;许忠淮等,1979,1983,1989). 当 P 波初动数据足够多,且有很好的方位覆盖,则可以获得

约束较好的综合震源机制解,即给出网格点处最优且可靠的应力场方向.

本研究中用于计算 P 波射线离源角和方位角所使用的速度模型参数见表 2,该模型参数依据由 Crust2.0 中获得.

表 2 鄂尔多斯块体地壳速度模型

Table 2 The crustal velocity model of the Ordos block

层顶埋深(km)	P 波速度(km · s ⁻¹)
0	2.5
0.1	6.2
10.1	6.4
20.1	6.4
31	6.8
100	7.9

3 应力场计算结果及分析

应用上文所述资料和方法,我们对研究区域进行了经纬度网格为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的空间扫描,获得了每个网格点内的最优综合震源机制解,所得的综合震源机制解的 P 、 T 轴方位空间分布、各个网格点所用数据个数和矛盾比情况见图 3 和图 4. 以下的图件中,为了避免初动符号数过少对结果可靠性的影响,我们舍弃了网格内数据加权后初动符号数小

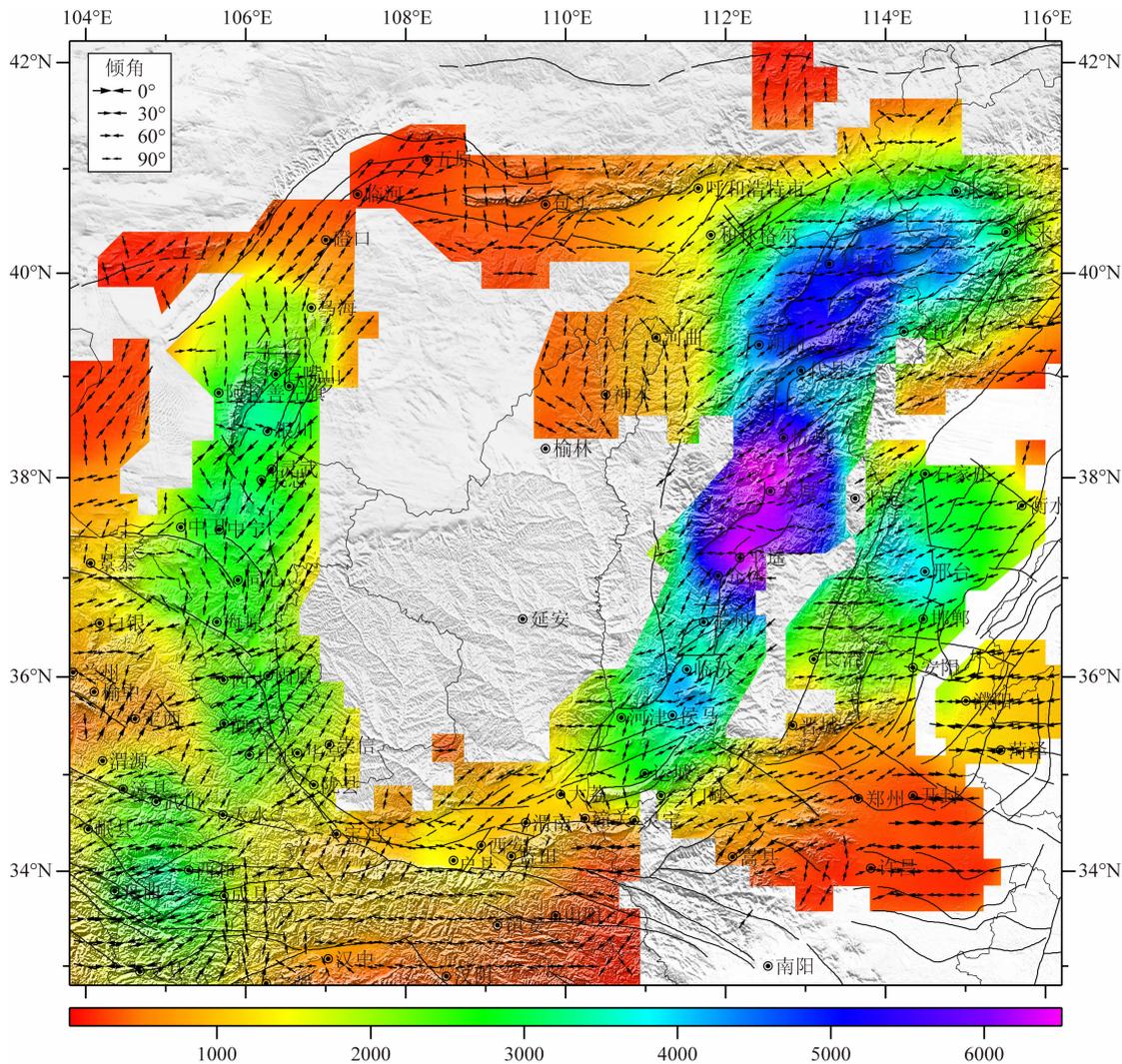


图 3 P 轴方位和网格点使用 P 波初动符号数分布图

Fig. 3 The distribution of the azimuth of P axis and the number of P wave first motion data used in each grid

于 50 的数据. 为了去除地震发生较少的网格点, 以及避免结果过分依赖于周边区域地震数据, 舍弃了网格点内数据平均权重小于 0.15 网格点的反演结果. 由图 3 可见, 各个网格点内 P 波初动符号数据量较为充足, 为应力场反演结果的可靠性奠定了基础, 总体来说受地震活动性影响, 东缘各个网格点使用的 P 波初动数据量较大, 西缘次之, 北缘地区 P 波初动数据量最少. 由图 4 可见, 在整个鄂尔多斯周缘地区, 各个网格内的矛盾比较高, 特别是在其西南缘地区矛盾比最高, 一定程度上反映了该区域应力场的复杂性, 具体原因还有待于进一步分析.

参照世界应力图的划分原则 (Zoback, 1992), 根据震源机制解 3 个应力轴倾角的大小, 将震源机制解类型 (即其反映的应力状态) 分为 6 种: 正断型 (NF)、正走滑型 (NS)、走滑型 (SS)、逆走滑型 (TS)、逆断型 (TF) 和不确定型 (U). 具体分类标准

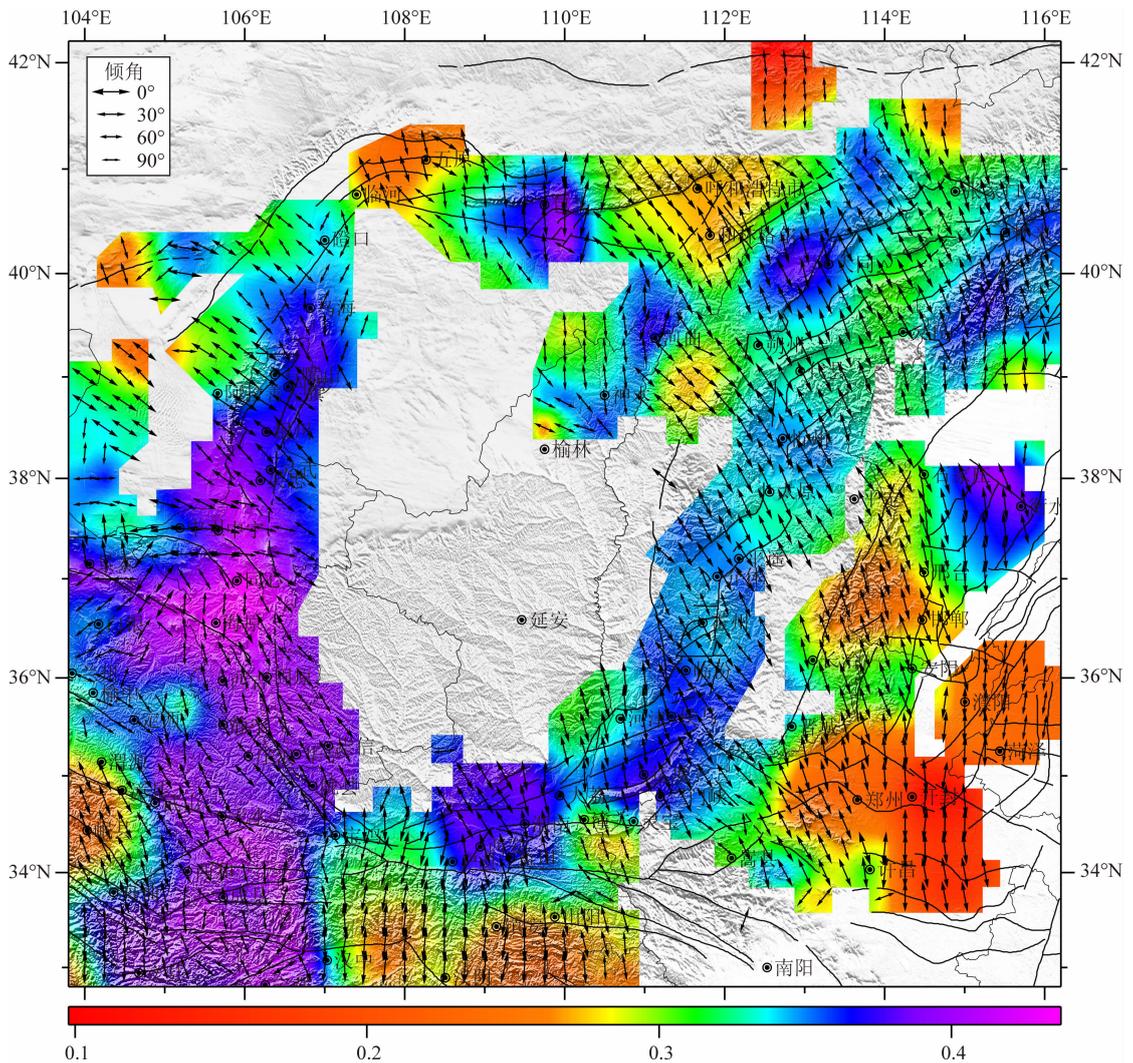
见表 3. 根据上述分类标准, 用不同颜色表示不同类型的震源机制解, 不同类型震源机制解的分布情况见图 5.

以下我们根据 P 轴方位分布图、T 轴方位分布

表 3 震源机制解类型划分表

Table 3 Categories of tectonic stress regime for focal mechanism

类型	P 轴倾角	B 轴倾角	T 轴倾角
NF	$\geq 52^\circ$		$< 35^\circ$
NS	$40^\circ \leq \text{倾角} < 52^\circ$		$< 20^\circ$
SS	$< 40^\circ$	$> 45^\circ$	$< 20^\circ$
TS	$< 20^\circ$	$> 45^\circ$	$< 40^\circ$
TF	$< 35^\circ$		$40^\circ \leq \text{倾角} < 52^\circ$
U			$\geq 52^\circ$
	上述类型之外的震源机制解		

图 4 T 轴方位和矛盾比分布图Fig. 4 The distribution of the azimuth of T axis and the contradictory ratio

图和综合震源机制解分布图,由银川—吉兰泰断陷带开始,沿顺时针方向,对鄂尔多斯周缘地壳应力场计算结果进行分析。

3.1 银川—吉兰泰断陷带内应力场结果及分析

银川—吉兰泰断陷带位于鄂尔多斯块体西北侧,南起牛首山,北达狼山以南,由银川盆地、贺兰山地垒和吉兰泰盆地作右行雁裂式排列组成,断层十分发育,在第四纪大多有不同程度的活动,它们控制着区域地貌及沉积的形成和演化。按走向与性质,可将断裂分为三组,即北北东至北东向断裂、北西向断裂和东西向断裂。本断陷带内北北东至北东向断裂是第四纪以来活动性最强的一组断裂,它不仅控制地堑的形成,而且与地震活动关系也最紧密,其性质为张性右旋;北西西向断裂性质为压性左旋(邓起东和尤惠川,1985;国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组,1988)。由图 3 可见,在该区域内主压

应力轴方位从南向北,总体上由北东向逐渐变为北北东向,与先前的应力场研究结果较为一致(李孟鑫和赵知军,1981,1986;赵知军和刘秀景,1990;赵知军等,2002;许忠淮等,1989;范俊喜等,2003);同时也存在一定差异,具体表现为在银川以北至乌海以西地区,前人研究给出的 P 轴方位为北北东向(薛宏运和鄢家全,1984;赵知军和刘秀景,1990;范俊喜等,2003),我们给出的 P 轴方位为近南北向,且倾角较大,差异的原因可能和应力场计算分区大小关系较大,先前的结果均为较大区域的平均结果,本研究结果在分区上更为精细。由图 4 可见, P 轴存在差异地区的 T 轴方位为北西西至北西向,倾角近水平,在银川盆地和吉兰泰盆地内 T 轴走向大体上与盆地走向相垂直,反映了盆地的拉张状态,故上述差异可能是我们的分区更小,体现了该区域的局部应力场特征。在图 5 中,综合震源机制解在银川盆地和

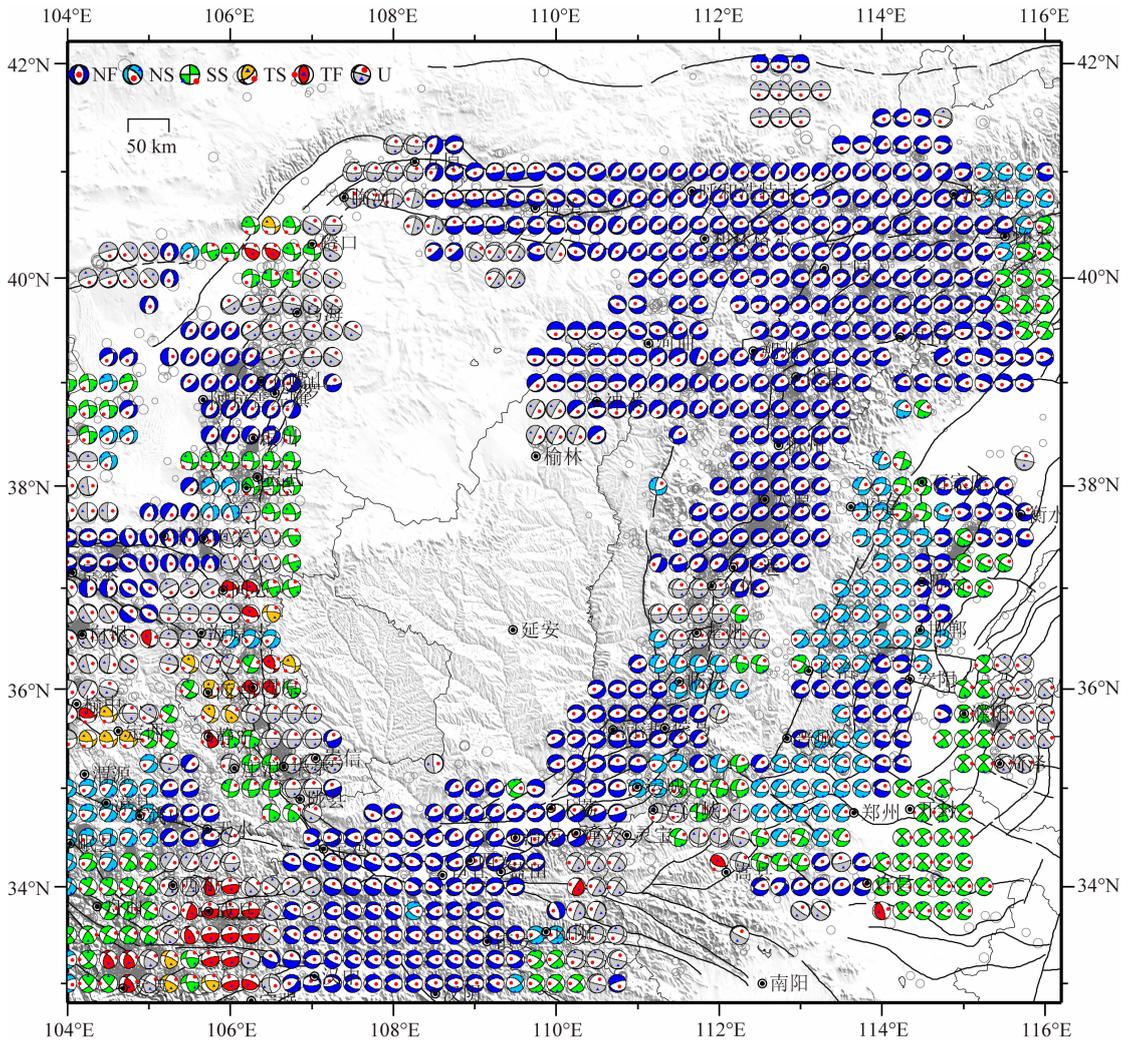


图 5 综合震源机制解分布图

Fig. 5 The distribution of composite focal mechanism

吉兰泰盆地东南为正断层,且走向大体为北北东向,和张性盆地及主要断裂的展布相一致,进一步说明了拉张正断层的性质.在石嘴山至乌海附近区域,震源机制解类型以不确定型为主,目前推测其可能和该处有近东西向的正宜关断裂有关,正宜关断裂现代活动为挤压兼左旋走滑为主(国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组,1988),该区域的应力场主要为拉张走滑型,而应力场反演的前提条件是被反演应力场的研究区域具有均匀的应力场,因此可能是此处应力场的不均匀性所致,具体原因还有待进一步分析.在磴口以西地区,综合震源机制解类型表现为走滑型为主,该走滑型机制解也表现出一定的逆冲分量,且有两个为近纯逆冲型,综合震源机制解类型和该区域的狼山—巴音乌拉山东麓断裂的正断层性质不符.但从 P 、 T 轴方位来看, T 轴走向与狼山—巴音乌拉山断裂相垂直(图 4), P 轴的走向与主要断裂相平行(图 3),与先前研究结果较为一

致(赵知军和刘秀景,1990;赵知军等,2002).

3.2 河套断陷带内应力场结果及分析

河套断陷带位于阴山隆起和鄂尔多斯隆起之间,西界为狼山山前断裂,东界是和林格尔断裂,北界为阴山山前断裂,南界为鄂尔多斯北缘断裂.广阔的河套盆地东西长约 440 km,南北宽约 40~80 km,总体走向近东西.河套断陷带可划分为三个凹陷,即临河凹陷、白彦花凹陷和呼和凹陷.河套断陷带周边主要发育正断层,局部见张扭性正断层,主要显示左旋扭动特征,其新构造运动以垂直差异运动为主.由图 4 可见, T 轴方位为北北西向,与先前研究结果较为一致(许忠淮等,1989;范俊喜等,2003;徐纪人和赵志新,2006), P 轴方位为北北东向,但在包头附近 P 轴方位出现了北北西向,这一现象在先前分区较大的研究中没有出现(许忠淮等,1989;范俊喜等,2003),但在中国大陆现代应力场图中也有类似情况(谢富仁等,2004),我们认为先前研究仅给出了总体

趋势,本次研究对研究区域的细分,显示出局部应力场的特性和应力场的不均匀性.图5中,在整个河套断陷带内,除临河盆地西部综合震源机制解结果为不确定型,其余区域的综合震源机制解结果均为正断层型,且综合震源机制解的节面走向大体与边界主要断层走向相一致,节面由西部的近东西向,向东逐渐变为北东向,与河套断陷带的东界和林格尔断裂走向相一致,综合震源机制解结果反映了河套断陷带现今应力状态为拉张.

3.3 岱海断陷带内应力场结果及分析

在岱海断陷带内,控制岱海断陷带的主要断裂为蛮汉山山前断裂带、鞍子山山前断裂带和岱海—黄旗海南缘断裂带,它们沿北东东向展布,均为张性或张扭性正断层(国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组,1988).由图4可见, T 轴的方位和控制岱海断陷带的主要断裂近垂直,且倾角近水平,而此处 P 轴(见图3)的倾角较大,说明岱海断陷带的应力类型为拉张型应力场, P 、 T 轴方位与先前的研究结果相一致(薛宏运和鄢家全,1984;许忠淮等,1989;范俊喜等,2003;谢富仁等,2004).图5中综合震源机制解结果为正断层,且综合震源机制解的节面大体上呈北东东向,该结果和控制岱海断陷带的主要断裂在性质及走向上均相一致,反映了岱海断陷带现今应力状态为拉张型.

3.4 山西断陷带内应力场结果及分析

山西断陷带位于鄂尔多斯块体的东侧,是由十来个大小不等的北东、北东东走向的地堑或半地堑式盆地作右行斜列组成,总体走向北北东,平面上呈“S”形.该带与阴山隆起相邻,南与渭河断陷带东端的运城盆地以隆起相隔,西为鄂尔多斯块体东部的吕梁山隆起,东为太行山隆起.山西断陷带盆地的排列形式、盆地边界的对称分布特征、盆地边缘山地与平原地貌的强烈对照性,均是断陷带整体作右旋剪切拉张的产物,山西断陷带是一条右旋剪切拉张带(邓起东和尤惠川,1985;胡惠民,1987;国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组,1988).由图3和4可见,在山西断陷带内 P 、 T 轴方位的空间分布总体趋势和先前研究结果较为一致(梁海庆等,1986;许忠淮等,1989;成尔林和张美芳,1990;刘巍等,1993;邓起东等,1999;范俊喜等,2003;谢富仁等,2004;徐黎明等,2006).在图5中,山西断陷带综合震源机制解总体上为近纯正断层型地震,综合震源机制解的节面大体呈北东东向展布,在各个盆地内部节面随盆地边界的主要控制断裂的走向变化.

在临汾盆地北端和太原盆地以南一段,震源机制解较为复杂.其中临汾盆地北端的综合震源机制解类型为正断走滑型以及个别震源机制解表现为走滑型,节面走向也有别于临汾盆地的纯正断层机制解,该处综合震源机制解类型变化可能与霍山山前断裂以及灵石隆起相关.霍山山前断裂发育在临汾盆地东缘北段,是山西断陷带中结构最复杂的张扭性断裂,总体走向 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$,断面倾向北西,倾角 $65^{\circ}\sim 75^{\circ}$.可见此处综合震源机制解和霍山山前断裂性质相似,我们认为此处应力场也主要受到霍山山前断裂的影响而出现了变化.在霍州附近综合震源机制解结构为不确定型,呈现出不同于山西地堑带的局部应力场特征,由图中构造可见该处的地质构造复杂,断裂走向与周边的主要断裂走向存在差异,而近东西向的横向断裂的第四纪活动以左旋正倾滑为主,个别有逆倾滑(国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组,1988),此处也恰好为太原盆地和临汾盆地间的灵石隆起,而盆地间的横向隆起则为剪切带次级破裂之间的岩桥区内的一种推挤型隆起(邓起东等,1973;邓起东和尤惠川,1985),故我们推测此处综合震源机制解的复杂性由此处的构造复杂性所引起,或者说是此处地震类型复杂,有左旋正倾滑和逆倾滑地震,而应力场计算是我们假定其具有均匀应力场,故所得综合震源机制解为不确定型,即为复杂应力场的一个平均,霍州附近区域的应力场还有待进一步深入研究.

3.5 渭河断陷带内应力场结果及分析

渭河断陷带位于鄂尔多斯块体南缘、秦岭断块山地以北,由渭河、运城、灵宝三个断陷盆地及其他构造单元如凸起和小型断块山地组成,总体呈近东西向分布,向东逐渐转为北东东向,东北部与山西断陷带为邻,西端与鄂尔多斯西南边界弧形断裂束相接.盆地两侧均为正断层所控制,盆地为左旋剪切拉张带(邓起东和尤惠川,1985;胡惠民,1987;国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组,1988).由图3和图4可见, P 、 T 轴总体方位分布和先前研究结果较为一致(薛宏运和鄢家全,1984;许忠淮等,1989;范俊喜等,2003;谢富仁等,2004;徐黎明等,2006). T 轴方位大体上呈北北西,大体与渭河盆地内断陷盆地走向近垂直,倾角近水平; P 轴倾角较大,反映了渭河断陷带现今处于拉张型应力状态,与盆地构造相吻合.在图5中,综合震源机制解结果在渭河断陷带内均为正断层型为主,部分综合震源机制解有少量的走滑分量,节面总体分布与盆地走向

相吻合.从综合震源机制解类型来看,本区域内现今应力状态以拉张为主.

3.6 鄂尔多斯块体西南边缘应力场结果及分析

鄂尔多斯块体的西南边缘(从宁夏南部中宁、中卫一带至陕西宝鸡)是一条特殊性质的边界,它没有发育拉张性质为主的地堑式盆地,而是以一组向北突出的弧形断裂为特色.这些弧形断裂第四纪以来以强烈的挤压性质及左旋走滑运动区别与鄂尔多斯边缘的其他活动断裂(邓起东和尤惠川,1985;胡惠民,1987;国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组,1988).由图3和图4可见,该区域的 P 轴方位大体上以北东至北北东向为主,倾角较为水平; T 轴呈北西至北西西向,倾角较小,但稍大于 P 轴倾角, P 、 T 轴方位大体上和先前结果较为一致(薛宏运和鄢家全,1984;许忠淮等,1989;杜兴信和邵辉成,1999;范俊喜等,2003;谢富仁等,2004;张辉等,2012).从 P 、 T 轴倾角均较小, T 轴倾角略大于 P 轴来看,该区域的应力类型应为剪切挤压型.在图5中,该区域的综合震源机制解类型较为复杂,用上述震源机制解的分类方法所分的几种类型在该区域均有,在海原—景泰断裂至牛首山断裂间,综合震源机制解类型大多为正断层型,与先前认为该区域的逆冲兼有左旋走滑性质不一致,具体原因还有待于进一步研究.从海原向南综合震源机制解类型变为逆冲兼走滑型,逐渐过渡到走滑型,但细看震源机制解,我们不难发现被分为不确定型的和走滑型的综合震源机制解中都含有一定的逆冲分量,在一定程度上反映了该区域的应力场中均存在挤压分量.至于用上述震源机制解分类方法,分得的结果致使部分综合震源机制解没有显示出其所含的逆冲性,可能是所用分类方法的区分度有限,只能归结为上述的6种类型.由海原至陇县的综合震源机制解均具有逆冲和走滑分量,可见该区域的应力场应为挤压走滑型.本区域的研究结果与先前的认识大体上一致,但逆冲强度较先前认识的要弱,具体原因仍需进一步研究.

3.7 鄂尔多斯块体邻近地区应力场结果及分析

由图3和图4可见,在甘东南地区, P 轴走向从兰州向南至文县,逐渐由北北东向转为近东西向, T 轴走向由北西西转为近南北向,和卜玉菲等(2013)利用甘东南宽频带流动台阵以及周边固定台站 P 波初动资料所得结果以及张辉等(2007)利用震源机制解所得应力场结果大体上一致.从图5看,该区域的综合震源机制解结果较为复杂,在漳县和岷县一

带综合震源机制解为正断走滑型, P 、 T 轴在方位上与卜玉菲等(2013)接近,本研究中给出的 P 轴倾角大于 T 轴倾角,与卜玉菲等(2013)的关于 P 、 T 轴倾角结果刚好相反,两个研究所用数据量大小相近,但本研究结果此处矛盾比相对较高,此处应力场结果还有待于进一步探讨.

从河北石家庄向南至河南许昌地区, P 轴方位由北向南,从西向东,逐渐由北东向转为近东西向, P 轴的倾角从西向东,倾角逐渐变得更加水平,表明由鄂尔多斯周缘的拉张型应力场向外逐渐过渡. T 轴方位呈北北西至南北向,随 P 轴一同呈现出规律性变化.上述 P 、 T 轴方位分布结果和已有研究结果较为一致(许忠淮等,1989;杜兴信和邵辉成,1999;徐纪人和赵志新,2006).

4 鄂尔多斯块体周缘断陷盆地成因推测

先前许多学者认为鄂尔多斯块体存在旋转(苏刚,1984;徐锡伟等,1994;邵辉成和苏刚,1999;张希等,2002;陈小斌等,2005);也有学者认为鄂尔多斯块体不存在旋转(邓起东和尤惠川,1985;邓起东等,1999;许忠淮等,2000),因为在其东北缘地区和外围是相连的,没有环向的走滑断层活动.且不论是顺时针旋转还是逆时针旋转,和其东西两侧的右旋剪切拉张带以及南北两侧的左旋剪切拉张带性质相矛盾;若鄂尔多斯块体是相对坚硬且旋转的块体,则其周缘的运动速度或是地震活动性应大体一致,但其西北角地震活动性明显低于其他区域.我们的研究结果表明,在环绕鄂尔多斯周缘的银川—吉兰泰断陷带、河套断陷带、岱海断陷带、山西断陷带和渭河断陷带内,综合震源机制解结果均以正断层型为主,且综合震源机制解节面走向的变化与控制断陷带边界的主要断裂走向相一致,拉张轴近似垂直于断层走向,与鄂尔多斯周缘断陷带现今的拉张状态相一致.为了合理解释这一现象,我们由邓起东和尤惠川(1985)的研究入手,他们利用带有刚性椭圆核的无限平板在远场压应力作用下的平面应力问题分析了鄂尔多斯周缘的构造活动及应力场,得到鄂尔多斯周缘地区可以分为四个区域,其中西北和东南两区为凹陷区,东北和西南两个区为挤压隆起区,上述研究结果大体上和我們所获得的应力场结果相一致,但在东北区我们的应力场结果为拉张型,与之相矛盾.鄂尔多斯东北区也为张性的盆地为主,与邓起东和尤惠川(1985)的挤压隆起区结果相矛盾,而和本

研究结果较为符合. 鄂尔多斯东北缘地区存在多个相互平行的拉张盆地, 我国著名的大同第四纪火山群分布在这一区域, 火山岩包裹体研究揭示, 在第四纪时期, 该地区上地幔仍然继续其底辟上涌过程(陈孝德等, 1997; 陈孝德等, 2001). 地震成像研究揭示, 该地区在上地幔范围内存在明显的低速异常(何正勤等, 2009). 综合上述研究结果, 我们推测在鄂尔多斯东北缘地区, 盆地下方深部物质的上涌形成的拉张作用大于邓起东和尤惠川(1985)推导出的挤压作用, 故表现为拉张性. 鄂尔多斯块体在其西南角受到来自青藏高原北东向的挤压力作用, 其余区域均受到北西—南东向的水平拉张力作用, 由于其自身是一个较为稳定的块体, 故而在其周缘形成了一系列的断陷盆地. 在鄂尔多斯块体周缘及附近区域, 主应变场为 NEE-SWW 方向压缩与 NNW-SSE 方向扩张; 主张应变大于主压应变, 并推测其原因很可能是与华北地壳的底部受到地幔物质上隆作用而产生的 NW-SE 方向的扩张力有关(张静华等, 2004). 沈正康等(2003)给出的鄂尔多斯周缘地区扩容率相对较大, 鄂尔多斯周缘的应变场以及扩容率与鄂尔多斯块体处于北北西—南南东向的水平拉张力作用为主, 的应力场相符. 至此, 鄂尔多斯块体在西南角受到来自青藏高原的挤压和其东北角深部物质上涌形成的拉张力的联合作用, 上述作用使得鄂尔多斯周缘地区除西南区为挤压区外, 其余区域均为剪切拉张区得到了合理的解释, 并与先前研究认为鄂尔多斯周缘地区处于引张应力场作用相符合(高名修, 1979; 成尔林和张美芳, 1990; 刘巍等, 1995), 较好地解释了环鄂尔多斯周缘的断陷盆地构造, 亦符合鄂尔多斯块体东西两侧的右旋剪切拉张带以及南北两侧的左旋剪切拉张带.

5 结论

我们将综合震源机制解法应用于鄂尔多斯周缘地壳应力场的计算, 使用了 2007 年 8 月 1 日至 2013 年 7 月 21 日鄂尔多斯块体周缘发生的 8499 个地震的 49844 个 P 波初动符号资料, 所得的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 应力场结果基本上覆盖了鄂尔多斯周缘地区.

根据鄂尔多斯块体周缘地区应力场的初步结果, 我们得到鄂尔多斯块体周缘地壳应力场具有以下特征:

(1) 在环绕鄂尔多斯周缘的银川—吉兰泰断陷

带、河套断陷带、岱海断陷带、山西断陷带和渭河断陷带内, 综合震源机制解结果以正断层型为主, 且综合震源机制解节面走向大体与控制断陷带边界的主要断裂走向相一致, 与鄂尔多斯周缘断陷带现今的拉张状态相一致.

(2) 在鄂尔多斯西南缘, 综合震源机制解类型主要为逆冲、逆冲走滑和走滑型, 反映了鄂尔多斯块体在西南缘受到青藏高原北东向的挤压作用. 鄂尔多斯西南缘的应力场的主压应力方向在远处为东向, 源自于青藏高原向东北挤压的作用, 靠近鄂尔多斯块体表现为北东—南西向.

(3) P 轴方位在局部地区变化较大, 但总体呈现规律性变化. P 轴方位在鄂尔多斯块体西缘, 从南向北, 主压应力轴方位更加偏北; 在其北缘, 由西向东, 主压应力轴方位更加偏东. 在其南缘和东缘, 主压应力轴方位变化不大, 大体上平行于控制各断陷带主要断裂的走向. P 轴倾角在西南缘为近水平, 在其周缘各盆地内 P 轴倾角近直立.

(4) T 轴方位总体表现为北西—南东向; 在鄂尔多斯周缘的断陷带内, T 轴走向大体与控制断陷带主要断裂走向以及断陷盆地走向相垂直.

(5) 鄂尔多斯块体在其西南角受到来自青藏高原的北东向挤压和其东北角深部物质上涌形成的北西—南东向拉张力联合作用, 上述作用使得鄂尔多斯周缘地区除西南区为挤压区外, 其余区域均为剪切拉张区, 与先前研究认为鄂尔多斯周缘地区处于引张应力场作用相符合, 较好地解释了环鄂尔多斯周缘的断陷盆地构造, 与鄂尔多斯块体东西两侧的右旋剪切拉张带以及南北两侧的左旋剪切拉张带相符合.

6 地震目录误差对结果的影响与结果讨论

地震目录中事件参数的测定误差总是不可避免的, 震中位置及震源深度测定误差会影响到 P 波初动符号在震源球上的位置, 这将会对计算结果产生何种影响及其影响程度如何? 对此我们采用类似蒋长胜等(2013)的方法, 对地震目录中的地震位置参数加入随机误差的方式来考察研究结果的稳健性. 我们选择了研究区域中经、纬度分别为 112.25° 、 40.25° 的网格点进行测试, 由图 3 和图 4 可见, 该网格点的 P 波初动符号数和矛盾比均处于中等水平, 故我们选择该网格点进行测试. 我们对该网格点计

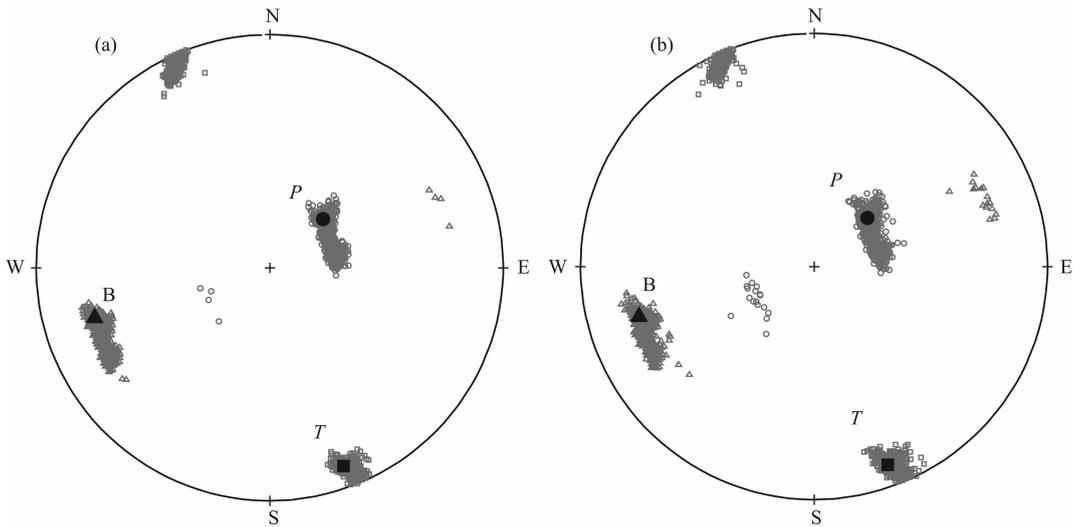


图6 加入随机误差后应力场计算结果施密特图

实心圆、三角形和正方形分别表示未加入误差时综合震源机制解的 P 、 B 和 T 轴方向；空心图形表示加入随机误差后的计算结果。图(a)中震中位置和震源深度误差均为 $[-5 \text{ km}, 5 \text{ km}]$ 之间，图(b)中震中位置误差同图(a)，震源深度误差为 $[-10 \text{ km}, 10 \text{ km}]$ 。

Fig. 6 Schmidt projection of the stress field calculation results after adding random error

Circle, triangle and square indicate the direction of P , B and T axis of the composite focal mechanism by using the data without random error, respectively. The corresponding hollow symbols indicate the calculation results of the data with random error. The error of hypocenter and focal depth is between -5 km and 5 km in figure (a), figure (b) with the same hypocenter error as figure (a), the error of focal depth is between -10 km and 10 km in figure (b).

算应力场时所用的地震震中位置和震源深度均加入随机误差，再根据加入随机误差后的数据计算应力场，反复进行 1000 次试算以考察事件参数误差对应力场计算结果的影响。第一次试验震中位置和震源深度加入的随机误差均为 $[-5 \text{ km}, 5 \text{ km}]$ 之间，所得结果见图 6a；第二次试验震中位置误差同第一次试验，震源深度误差为 $[-10 \text{ km}, 10 \text{ km}]$ 之间，所得结果见图 6b。由图 6 可见，加入随机误差后应力场计算结果受到了一定程度的影响，且深度误差增大后，计算结果离散程度增大，但整体来看计算结果还是稳健的，反映了虽然地震目录中事件参数的不确定性会影响到应力场计算结果，但当数据量较大时，应力场计算结果受到地震事件参数测定误差的影响较小。这一现象的原因可能是由于综合震源机制解法应用了大量的 P 波初动数据，大量数据间的随机误差相互抑制，因而所得应力场计算结果相对较稳定。

在本研究中地震参数我们直接使用了中国地震台网给出的地震目录，没有对其进行进一步的精确定位，一方面因为在对地震进行精定位时，对地震观测要求较高，如地震事件须被 4 个以上台站记录到，这样会导致部分小地震事件不满足精定位要求而被舍弃，其初动符号也就不能够被用于应力场计算，这将会使可用初动符号数大大减少；另一方面由上述

试验结果可见，在 P 波初动数据量较大时，地震事件的参数对应力场计算结果的影响较小，故没有对地震事件进行精定位。地震参数对于应力场计算结果终究有一定程度的影响，且当参与计算的数据量较少时，影响可能会增大，因而在后续研究中应予以重视。鄂尔多斯块体周缘主应力方向分布情况，和先前研究结果总体上较为一致（薛宏运和鄯家全，1984；许忠淮等，1989；范俊喜等，2003；谢富仁等，2004；徐黎明等，2006）。同时，所给出的精细应力场中也出现了和先前研究不一致的地方，如鄂尔多斯块体西南缘的逆冲程度不如先前认为的强烈等，有个别地区出现了应力场方向的突然变化的现象，这种现象体现了应力场的不均匀性还是由于其他原因所致，若是应力场不均匀性的体现，其和局部地质构造的关系又是什么？上述现象的解释和探究将是我们下一步的研究工作。

致谢 中国地震局地球物理研究所“国家数字测震台网数据备份中心”为本研究提供地震波形数据；中国地震局地球物理研究所蒋长胜研究员给予的帮助和指导；文中部分图件利用 Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel & Smith, 1995) 绘制的，审稿人的建议对本文质量的提高有很大帮助，在此一并致谢。

References

- Aki K. 1966. Earthquake generating stress in Japan for the years 1961 to 1963 obtained by smoothing the first motion radiation patterns. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 44(2): 447-471.
- An M J, Li F Q. 1998. Current tectonic stress field of Shanxi graben system. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 20(5): 461-465.
- Bu Y F, Zhang Y S, Wan Y G, et al. 2013. The tectonic stress field in Southeastern area of Gansu province deduced from P wave polarity data. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 35(1): 160-165.
- Chen A L, Zhao S L, Lu D H, et al. 1981. The characteristics of tectonic stress field and its relations to seismicity in Xiji-Haiyuan-Guyuan region. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 3(2): 31-38.
- Chen X B, Zang S X, Liu Y G, et al. Horizontal movement of Ordos block and the interaction of Ordos block and adjacent blocks. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 22(3): 309-314.
- Chen X D, Lin C Y, Zhang X O, et al. 1997. Deformation features of mantle xenoliths from Quaternary basalts in Datong, Shanxi province and their rheological implications. *Seismology and Geology* (in Chinese), 19(4): 313-320.
- Chen X D, Shi L B, Lin C Y. 2001. A research on Quaternary volcanism in north China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 23(4): 564-573.
- Cheng E L, Li G F, Chen H C. 1982. On the direction of the maximum compressive principal stress before and after the 1976 Songpan-Pingwu earthquake ($M=7.2$) of the Sichuan province. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 4(2): 136-148.
- Cheng E L, Zhang M F. 1990. Modern NW-NNW tension stress field of rift valley series in Shanxi province. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 12(4): 20-25.
- Deng Q D, Wang K L, Wang Y P, et al. 1973. On the tendency of seismicity and their geological set-up of the seismic belt of Shanxi graben. *Scientia Geologica Sinica* (in Chinese), (1): 37-47.
- Deng Q D, You H C. 1985. Mechanism and structural activity of Ordos basin. //Study on the Modern Crustal Movement (1) (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 58-78.
- Deng Q D, Cheng S P, Min W, et al. 1999. Discussion on Cenozoic tectonics and dynamics of Ordos block. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 5(3): 13-21.
- Du X X, Shao H C. 1999. Modern tectonic stress field in the Chinese mainland inverted from focal mechanism solutions. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 21(4): 354-360.
- Fan J X, Ma J, Diao G L. 2003. Contemporary tectonic stress field around the Ordos fault block inferred from earthquake focal mechanisms. *Seismology and Geology* (in Chinese), 25(1): 88-99.
- Fan T Y, Long C X, Yang Z Y, et al. 2012. Comprehensive modeling on the present crustal stress of China mainland with the viscoelastic spherical shell. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(4): 1249-1260, doi:10.6038/j.issn.00015733.2012.04.020.
- Gao M X. 1979. Current tensile stress field in the block-faulting tectonic areas of North China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1(2): 1-12.
- He Z Q, Ye T L, Ding Z F. 2009. Surface wave tomography for the phase velocity in the northeastern part of North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(5): 1233-1242, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.012.
- Hu H M. 1987. The characteristic of recent tectonic activity in Shanxi graben system. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 3(4): 67-73.
- Hu H M. 1989. The modern tectonic activity and regional stress field of the Ordos block and the graben system around it. *Collected Works of Tectonic and Crustal Stress* (in Chinese), 3: 60-68.
- Hua X W. 1980. Stress variations in the region around Beijing and Tianjin before and after the 1976 Tangshan earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2(2): 130-146.
- Jiang C S, Wu Z L, Zhuang J C. 2013. ETAS model applied to the earthquake-sequence association (ESA) problem: the Tangshan sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(9): 2971-2981, doi: 10.6038/cj920130911.
- Jiang J L. 1991. Recent tectonic stress field in Shanxi province and its adjacent area. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 13(4): 85-88.
- Kan R J, Liu Z Y, Wang S J, et al. 1983. The temporal variation of the orientation of the mean stress axis both before and after the strong Longling earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 26(6): 564-573.
- Li M L. 1985. The seismic activity and tectonic around Ordos block. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 7(Suppl.): 1-9.
- Li M L, Zhao Z J. 1981. Focal mechanism and stress field of Ningxia region. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 3(4): 49-55.
- Li M L, Zhao Z J. 1986. Modern tectonic stress field and its relation with seismicities in Ningxia and its neighborhood. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 9(3): 299-314.
- Li Q Z. 1980. General features of the stress field in the crust of North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 23(3): 376-388.
- Li Q Z, Wang Z G, Jia Y N, et al. 1973. Stress field obtained for two regions from weak earthquake data recorded at a single seismic station. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 16(1): 49-61.
- Liang H Q, Yang Z X, Guo Q L. 1986. Characteristics of present tectonic stress field of Shanxi graben system. *Earthquake* (in Chinese), (1): 47-52.
- Liu W, Zhao X P, An W P, et al. 1993. The crustal stress field in Shanxi province. *Earthquake Research in Shanxi* (in Chinese),

- (3): 3-11.
- Liu W, Zhao X P, An W P. 1994. Characteristics of stress field in Taiyuan basin. *Earthquake Research in Shanxi* (in Chinese), (1): 18-24.
- Liu W, Meng Y Y, Wang Z L. 1995. Present tectogenesis and characteristics of crustal stress field in Datong basin. *Earthquake Research in Shanxi* (in Chinese), (1): 7-13.
- Liu W, An W P, Zhao X P. 1996. Recent tectonic movement and recent crust stress field in Yuncheng basin. *Earthquake Research in Shanxi* (in Chinese), (2): 9-13.
- Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. 1995. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia. *Geology*, 23(8): 719-722.
- Peltzer G, Tapponnier P, Zhang Z T, et al. 1985. Neogene and Quaternary faulting in and along the Qinling Shan. *Nature*, 317(6037): 500-505.
- Shao H C, Su G. 1999. Analysis on the seismicity trend around the Ordos block. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 21(4): 395-398.
- Shen Z K, Jackson D D, Ge B X. 1996. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. *J. Geophys. Res.*, 101(B12): 27957-27980.
- Shen Z K, Wang M, Gan W J, et al. 2003. Contemporary tectonic strain rate field of Chinese continent and its geodynamic implications. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)* (in Chinese), 10(Suppl.): 93-100.
- Sheng S Z, Wan Y G, Li H G, et al. 2013. Direction of tectonic stress in Nantong city deduced from composite focal mechanism method. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 28(3): 1297-1303, doi: 10.6038/pg20130322.
- Su G. 1984. The research of regional seismicity using the moving-block as an unit (The Orduoce block and its seismicity). *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 6(2): 1-9.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10(12): 611-616.
- Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia. *Geological Society, London, Special Publications*, 19(1): 113-157.
- The Research Group on Active Fault System around Ordos Massif, SSB. 1988. Active Fault System Around Ordos Massif (in Chinese). Beijing: Seismological Press.
- Tian Z Y, Han P, Xu K D. 1992. The Mesozoic-Cenozoic East China rift system. *Tectonophysics*, 208(1-3): 341-363.
- Uyeda S, Kanamori H. 1979. Back-arc opening and the mode of subduction. *J. Geophys. Res.*, 84(B3): 1049-1061.
- Wan Y G. 2010. Contemporary tectonic stress field in China. *Earthq. Sci.*, 23(4): 377-386, doi: 10.1007/s11589-010-0735-5.
- Wan Y G, Wu Y M, Sheng S Z, et al. 2011. Priliminary result of Taiwan 3-D stress field from P wave polarity data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(11): 2809-2818, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.011.
- Wang S Y, Xu Z H. 1985. Seismo-tectonic stress field in east China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 7(1): 17-32.
- Wang S Y, Xu Z H, Yu Y X, et al. 1996. Inversion for the plate driving forces acting at the boundaries of China and its surroundings. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 39(6): 764-771.
- Wessel P, Smith W H F. 1995. New version of the generic mapping tools. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 76(33): 329-329.
- Xie F R, Cui X F, Zhao J T, et al. 2004. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 47(4): 654-662, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2004.04.016.
- Xie F R, Shu S B, Dou S Q, et al. 2000. Quaternary tectonic stress field in the region of Haiyuan-Liupanshan fault zone to Yinchuan fault-depression. *Seismology and Geology* (in Chinese), 22(2): 139-146.
- Xu J R, Zhao Z X. 2006. Regional characteristics of the lithospheric stress field and tectonic motions in China and its adjacent areas. *Geology in China* (in Chinese), 33(4): 782-792.
- Xu J R, Zhao Z X, Ishikawa Y. 2008. Regional characteristics of crustal stress field and tectonic motions in and around Chinese mainland. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(3): 770-781, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.03.018.
- Xu L M, Zhou L F, Zhang Y K, et al. 2006. Characteristics and tectonic setting of tectono-stress field of Ordos basin. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 30(4): 455-462.
- Xu M J, Jiang Y J, Zhou C Y. 1996. Preliminary analysis for the space distribution of present stress field in Jiangsu and its adjacent area. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 12(4): 383-388.
- Xu X W, Cheng G L, Ma X Y, et al. 1994. Rotation model and dynamics of blocks in North China and its adjacent areas. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 19(2): 129-138.
- Xu Z H, Liu Y F, Zhang Y Z, et al. 1979. On the characteristic of direction of the earthquake stress field around the Beijing area. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1(2): 121-132.
- Xu Z H, Yan M, Zhao Z H. 1983. Evaluation of the direction of tectonic stress in North China from recorded data of a large number of small earthquakes. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 5(3): 268-279.
- Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, et al. 1987. Direction of mean stress axes in southwestern China deduced from microearthquake data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 30(5): 476-486.
- Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, et al. 1989. The tectonic stress field of Chinese continent deduced from a great number of earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 32(6): 636-647.
- Xu Z H, Wang S Y, Gao A J. 2000. Present-day tectonic movement in the northeastern margin of the Qinghai-Xizang (Tibetan)

- plateau as revealed by earthquake activity. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 22(5): 472-481.
- Xu Z H. 2001. A present-day tectonic stress map for eastern Asia region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 23(5): 492-501.
- Xue H Y, Yan J Q. 1984. The contemporary crustal stress field around the Ordos block. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 27(2): 144-152.
- Yan J Q, Shi Z L, Wang S Y, et al. 1979. Some features of the recent tectonic stress field of China and environs. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1(1): 9-24.
- Zhang D N, Gao L S. 1989. Three dimensional numerical simulation of eastern Asian stress field. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 5(4): 24-33.
- Zhang H, Liu X F, Zhao L Y. 2007. Characteristics analysis of the stress field in Gansu and its adjacent region with various focal mechanism solutions. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 27(2): 33-39.
- Zhang H, Gao Y, Shi Y T, et al. 2012. Tectonic stress analysis based on the crustal seismic anisotropy in the northeastern margin of Tibetan plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(1): 95-104, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.009.
- Zhang J H, Li Y X, Guo L Q, et al. 2004. Study on present-day deformation and strain field in North China by use of GPS data. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 24(3): 40-46.
- Zhang X, Jiang Z S, Zhang X L, et al. 2002. A seismic negative dislocation inversion of recent horizontal crust movement in North China. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 22(3): 40-45.
- Zhang Y Q, Liao C Z, Shi W, et al. 2006. Neotectonic evolution of the peripheral zones of the Ordos basin and geodynamic setting. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 12(3): 285-297.
- Zhao Z J, Liu X J. 1990. Seismic activity and local tectonic stress field in Ningxia and nearby regions. *Seismology and Geology* (in Chinese), 12(1): 31-46.
- Zhao Z J, Liu X J, Kang L Y. 2002. Features of focal-mechanism solutions in Ningxia and its neighboring region. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 24(2): 162-166,173.
- Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, et al. 2009. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.
- Zhu S B, Shi Y L. 2006. Study on the cause of tectonic stress field of Chinese mainland and its adjacent area. *Science in China Series D (Earth Science)* (in Chinese), 36(12): 1077-1083.
- Zoback M L. 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere; the world stress map project. *J. Geophys. Res.*, 97(B8): 11703-11728.
- ### 附中文参考文献
- 安美建, 李方全. 1998. 山西地堑系现今构造应力场. *地震学报*, 20(5): 461-465.
- 卜玉菲, 张元生, 万永革等. 2013. P 波极性揭示的甘东南地区构造应力场特征. *地震工程学报*, 35(1): 160-165.
- 陈爱玲, 赵淑兰, 吕德徽等. 1981. 西海固地区构造应力场特征及其与地震活动性的关系. *西北地震学报*, 3(2): 31-38.
- 陈小斌, 臧绍先, 刘永岗等. 2005. 鄂尔多斯地块的现今水平运动状态及其与周缘地块的相互作用. *中国科学院研究生院学报*, 22(3): 309-314.
- 陈孝德, 林传勇, 张小鸥等. 1997. 山西大同第四纪火山岩中幔源包体的变形特征及其上地幔流变学意义. *地震地质*, 19(4): 313-320.
- 陈孝德, 史兰斌, 林传勇. 2001. 华北第四纪火山作用研究. *地震地质*, 23(4): 564-573.
- 成尔林, 李桂芳, 陈和川. 1982. 1976年四川省松潘—平武7.2地震前后主压应力轴的方向特征. *地震学报*, 4(2): 136-148.
- 成尔林, 张美芳. 1990. 山西地堑系现代北西—北北西向拉张应力场. *西北地震学报*, 12(4): 20-25.
- 邓起东, 王克鲁, 汪一鹏等. 1973. 山西隆起区断陷地震带地震地质条件及地震发展趋势概述. *地质科学*, (1): 37-47.
- 邓起东, 尤惠川. 1985. 鄂尔多斯周缘断陷盆地带的构造活动特征及其形成机制. //现代地壳运动研究(1). 北京: 地震出版社, 58-78.
- 邓起东, 程绍平, 闵伟等. 1999. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论. *地质力学学报*, 5(3): 13-21.
- 杜兴信, 邵辉成. 1999. 由震源机制解反演中国大陆现代构造应力场. *地震学报*, 21(4): 354-360.
- 范俊喜, 马瑾, 刁桂苓. 2003. 由小震震源机制解得到的鄂尔多斯周边构造应力场. *地震地质*, 25(1): 88-99.
- 范桃园, 龙长兴, 杨振宇等. 2012. 中国大陆现今地应力场黏弹性球壳数值模拟综合研究. *地球物理学报*, 55(4): 1249-1260, doi:10.6038/j.issn.00015733.2012.04.020.
- 高名修. 1979. 华北断块构造区的现代引张应力场. *地震地质*, 1(2): 1-12.
- 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组. 1988. 鄂尔多斯周缘活动断裂系. 北京: 地震出版社.
- 何正勤, 叶太兰, 丁志峰. 2009. 华北东北部的面波相速度层析成像研究. *地球物理学报*, 52(5): 1233-1242, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.012.
- 胡惠民. 1987. 山西地堑系的现代构造活动特征. *中国地震*, 3(4): 67-73.
- 胡惠民. 1989. 鄂尔多斯及其周缘断陷盆地现代构造活动与区域应力场. *地壳构造与地壳应力文集*, 3: 60-68.
- 华祥文. 1980. 唐山强震前后北京、天津周围地区应力的变化过程. *地震学报*, 2(2): 130-146.
- 蒋长胜, 吴忠良, 庄建仓. 2013. 地震的“序列归属”问题与 ETAS 模型——以唐山序列为例. *地球物理学报*, 56(9): 2971-2981, doi: 10.6038/cj920130911.

- 姜家兰. 1991. 陕西及其邻近地区现代构造应力场. 西北地震学报, 13(4): 85-88.
- 阚荣举, 刘祖荫, 王绍晋等. 1983. 龙陵地区大地震前后平均应力轴取向的时间变化. 地球物理学报, 26(6): 564-573.
- 李孟奎. 1985. 鄂尔多斯块体周围的地震活动与构造. 西北地震学报, 7(增刊): 1-9.
- 李孟奎, 赵知军. 1981. 宁夏地区的震源机制与应力场. 西北地震学报, 3(4): 49-55.
- 李孟奎, 赵知军. 1986. 宁夏地区现代构造应力场及其与地震活动的关系. 地震研究, 9(3): 299-314.
- 李钦祖. 1980. 华北地壳应力场的基本特征. 地球物理学报, 23(3): 376-388.
- 李钦祖, 王泽泉, 贾云年等. 1973. 由单台小地震资料所得两个区域的应力场. 地球物理学报, 16(1): 49-61.
- 梁海庆, 杨增学, 郭启良. 1986. 山西地堑系现今构造应力场特征. 地震, (1): 47-52.
- 刘巍, 赵新平, 安卫平等. 1993. 山西地区的地壳应力场. 山西地震, (3): 3-11.
- 刘巍, 赵新平, 安卫平. 1994. 太原盆地的应力场特征. 山西地震, (1): 18-24.
- 刘巍, 孟雁英, 王赵丽. 1995. 大同盆地现今构造活动及地壳应力场特征. 山西地震, (1): 7-13.
- 刘巍, 安卫平, 赵新平. 1996. 运城盆地的现今构造活动及现代地壳应力场的基本特征. 山西地震, (2): 9-13.
- 邵辉成, 苏刚. 1999. 鄂尔多斯周缘近期地震活动趋势分析. 西北地震学报, 21(4): 395-398.
- 沈正康, 王敏, 甘卫军等. 2003. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 10(特刊): 93-100.
- 盛书中, 万永革, 李红光等. 2013. 应用综合震源机制解法推断南甬通市地壳应力场方向. 地球物理学进展, 28(3): 1297-1303, doi: 10.6038/pg20130322.
- 苏刚. 1984. 以运动地块为单元的区域地震活动研究——鄂尔多斯地块和它的地震活动. 西北地震学报, 6(2): 1-9.
- 万永革, 吴逸民, 盛书中等. 2011. P波极性数据所揭示的台湾地区三维应力结构的初步结果. 地球物理学报, 54(11): 2809-2818, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.011.
- 汪素云, 许忠淮. 1985. 中国东部大陆的地震构造应力场. 地震学报, 7(1): 17-32.
- 汪素云, 许忠淮, 俞言祥等. 1996. 中国及其邻区周围板块作用力的研究. 地球物理学报, 39(6): 764-771.
- 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛等. 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区. 地球物理学报, 47(4): 654-662, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2004.04.016.
- 谢富仁, 舒塞兵, 窦素芹等. 2000. 海原, 六盘山断裂带至银川断陷第四纪构造应力场分析. 地震地质, 22(2): 139-146.
- 徐纪人, 赵志新. 2006. 中国岩石圈应力场与构造运动区域特征. 中国地质, 33(4): 782-792.
- 徐纪人, 赵志新, 石川有三. 2008. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究. 地球物理学报, 51(3): 770-781, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.03.018.
- 徐黎明, 周立发, 张义楷等. 2006. 鄂尔多斯盆地构造应力场特征及其构造背景. 大地构造与成矿学, 30(4): 455-462.
- 徐鸣洁, 姜永基, 周翠英. 1996. 江苏及邻区现代应力场空间分布特征分析. 中国地震, 12(4): 383-388.
- 徐锡伟, 程国良, 马杏垣等. 1994. 华北及其邻区块体转动模式和动力来源. 地球科学——中国地质大学学报, 19(2): 129-138.
- 许忠淮, 刘玉芬, 张郅珍. 1979. 京、津、唐、张地区地震应力场的方向特征. 地震学报, 1(2): 121-132.
- 许忠淮, 阎明, 赵仲和. 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向. 地震学报, 5(3): 268-279.
- 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊等. 1987. 由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征. 地球物理学报, 30(5): 476-486.
- 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊等. 1989. 由大量的地震的资料推断的我国大陆构造应力场. 地球物理学报, 32(6): 636-647.
- 许忠淮, 汪素云, 高阿甲. 2000. 地震活动反映的青藏高原东北地区现代构造运动特征. 地震学报, 22(5): 472-481.
- 许忠淮. 2001. 东亚地区现今构造应力图的编制. 地震学报, 23(5): 492-501.
- 薛宏运, 鄢家全. 1984. 鄂尔多斯地块周围的现代地壳应力场. 地球物理学报, 27(2): 144-152.
- 鄢家全, 时振梁, 汪素云等. 1979. 中国及邻区现代构造应力场的区域特征. 地震学报, 1(1): 9-24.
- 张东宁, 高龙生. 1989. 东亚地区应力场的三维数值模拟. 中国地震, 5(4): 24-33.
- 张辉, 刘小凤, 赵凌云. 2007. 由多个震源机制解分析甘肃及边邻地区应力场特征. 华南地震, 27(2): 33-39.
- 张辉, 高原, 石玉涛等. 2012. 基于地壳介质各向异性分析青藏高原东北缘构造应力场特征. 地球物理学报, 55(1): 95-104, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.009.
- 张静华, 李延兴, 郭良迁等. 2004. 用GPS测量结果研究华北现今构造形变场. 大地测量与地球动力学, 24(3): 40-46.
- 张希, 江在森, 张晓亮等. 2002. 华北地区近期地壳水平运动的非震负位错反演. 大地测量与地球动力学, 22(3): 40-45.
- 张岳桥, 廖昌珍, 施炜等. 2006. 鄂尔多斯盆地周边地带新构造演化及其区域动力学背景. 高校地质学报, 12(3): 285-297.
- 赵知军, 刘秀景. 1990. 宁夏及其邻区地震活动带与小区域构造应力场. 地震地质, 12(1): 31-46.
- 赵知军, 刘秀景, 康凌燕. 2002. 宁夏及邻近地区震源机制解特征. 西北地震学报, 24(2): 162-166, 173.
- 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁等. 2009. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑. 地球物理学报, 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.
- 朱守彪, 石耀霖. 2006. 中国大陆及邻区构造应力场成因的研究. 中国科学D辑(地球科学), 36(12): 1077-1083.