

豫北及邻区中小地震震源机制解及应力场反演^{*}

莘海亮, 方盛明, 樊计昌, 李 稳

(中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 利用区域地震台网的数字地震波记录资料, 由垂直向记录 P_g 和 S_g 振幅比值, 结合部分清晰的 P 波初动记录资料, 计算得到了 1985 ~ 2008 年在豫北及邻区发生的 145 个中小地震的震源机制解。通过统计方法、系统聚类分析方法及采用格点尝试法, 分析了震源机制解参数并求取了区域平均应力场。结果表明: 研究区震源机制解以走滑型为主, 应力轴比较接近水平, 区域构造应力场以水平挤压为主要特征; 震源机制解除走滑型外, 还有一定数量的正断型和逆断型。整体显示中小地震震源机制解种类较多, 分布散乱, 表明小地震发生具有随机性, 华北构造应力场整体的控制作用较弱。

关键词: 中小地震; 震源机制解; 聚类分析; 应力场; 豫北及邻区

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)02-0184-06

0 引言

地震的震源机制解从一定角度描述了震源的性质及其破裂过程, 因此, 地震震源机制解的确定, 对于地震的研究、孕震机理的解释及震后应力的分布, 具有十分重要的意义。对于震源机制理论和方法的研究, 一直是地震学研究的热点。由 P 波初动求取地震的震源机制解是地震学中一个常用的方法, 但这种方法要求所计算的地震被很多台站记录到 (付淑芳等, 1980)。对于小震而言, 能记录到小震的台站数量非常有限, 不能精确求解震源机制。为了解决这个问题, 梁尚鸿等 (1984) 提出利用区域地震台网 P 、 S 波垂直分量振幅比资料测定小震震源机制, 该方法具有精度高、需用的记录资料量少等优点。林纪曾和李幼铭 (1991) 对该方法进行了人工数据检验, 并且对台站偏于一侧时的资料处理能力及误差进行了估计。结果表明, 该方法不仅在正常情况下能够得到很好的结果, 而且在十分不利的资料条件下也可以得出令人满意的结果。胡新亮等 (2004)、张永久和程万正 (2007) 进一步分析证实了利用数字地震记录的 \bar{P} 、 \bar{S} 振幅比资料测定小震震源机制解的可靠性。闫俊岗等 (2008)、王曰风等 (2008)、张致伟等 (2010) 分别使用该方法对多

个地区的地震及余震序列进行震源机制解研究。

本文在梁尚鸿等 (1984) 提出的利用 P 、 S 波最大振幅比数据反演中小地震震源机制的基础上, 采用刁桂苓等 (2004) 提出的 P 波初动和 P 、 S 振幅比联合反演震源机制、系统聚类分析程序, 依据豫北及邻区最新的速度结构和地震精定位结果 (莘海亮等, 2011), 研究该区中小地震震源机制及其主要应力场特征。

1 研究区概况及资料选取

豫北及邻区 (张成科等, 1994; 杜广仁, 1998) 处于太行山与东部平原的分界区域, 包括华北拗陷区南部、鲁西隆起西部及山西隆起区东南部 (太行山隆起), 该区既有广阔的平原, 又有丘陵和山区; 同时该区又处于太行山东麓的地壳陡变带、重力异常梯级带上, 是断裂构造极其发育、地震频繁发生的地段。

本文研究区所选范围为 ($35.00^{\circ} \sim 37.17^{\circ}N$, $113.12^{\circ} \sim 115.83^{\circ}E$)。使用地震事件包括两部分: (1) 闫俊岗等 (2008) 求出了 1985 ~ 2000 年晋冀鲁豫相邻地区 102 次地震的震源机制解, 在本文研究区范围内有 96 次, 利用闫俊岗等 (2008) 提供的初始振幅数据, 笔者对这 96 次地震进行了重新计算。谢智等 (2002) 计算了 1965 ~ 2000 年河南

* 收稿日期: 2011-07-04.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40827001) 资助. 中国地震局地球物理勘探中心论著 RCEG201110.

及邻区共 52 次 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解，1985 年以来位于研究区范围内的地震共有 6 个，这些地震均包含在前述我们重新计算的 96 次地震中；(2) 对 2001 ~ 2008 年研究区范围内地震台网记录的地震事件，笔者选择至少 4 个以上的台站记录到且至少 1 个台的记录有清楚的 P_g 初动的地震记录，对地震波形数据进行挑选最后计算得到质量较好的 49 次地震的震源机制解。综上所述，研究区范围内笔者共得到 145 个地震的震源机制解，其中 $1.0 \leq M_L < 2.0$ 的地震有 13 个， $2.0 \leq M_L < 3.0$ 的地震有 93 个， $3.0 \leq M_L < 4.0$ 的有 39 个（图 1，采用下半球投影方式）。

2 中小地震震源机制解

对于大量震源机制解笔者采用统计分析，首先把 145 个地震震源机制解的各个参数进行划分，以每 10° 为单位对其进行归一频数计算（图 2）。

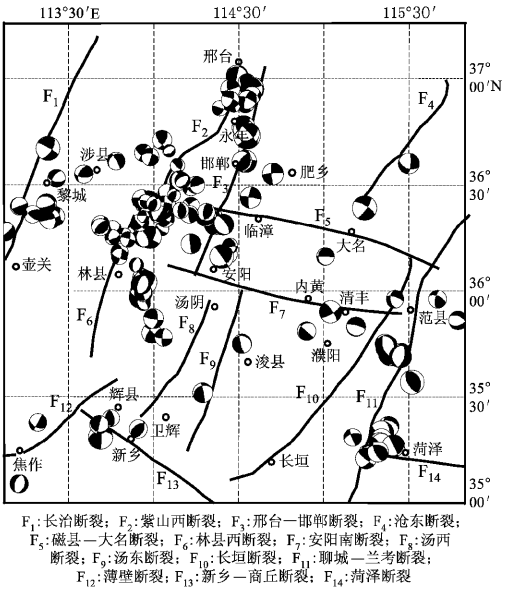


图 1 研究区活动断裂和 145 个震源机制解分布
Fig. 1 Active faults and distribution of the focal mechanism solutions of 145 earthquakes

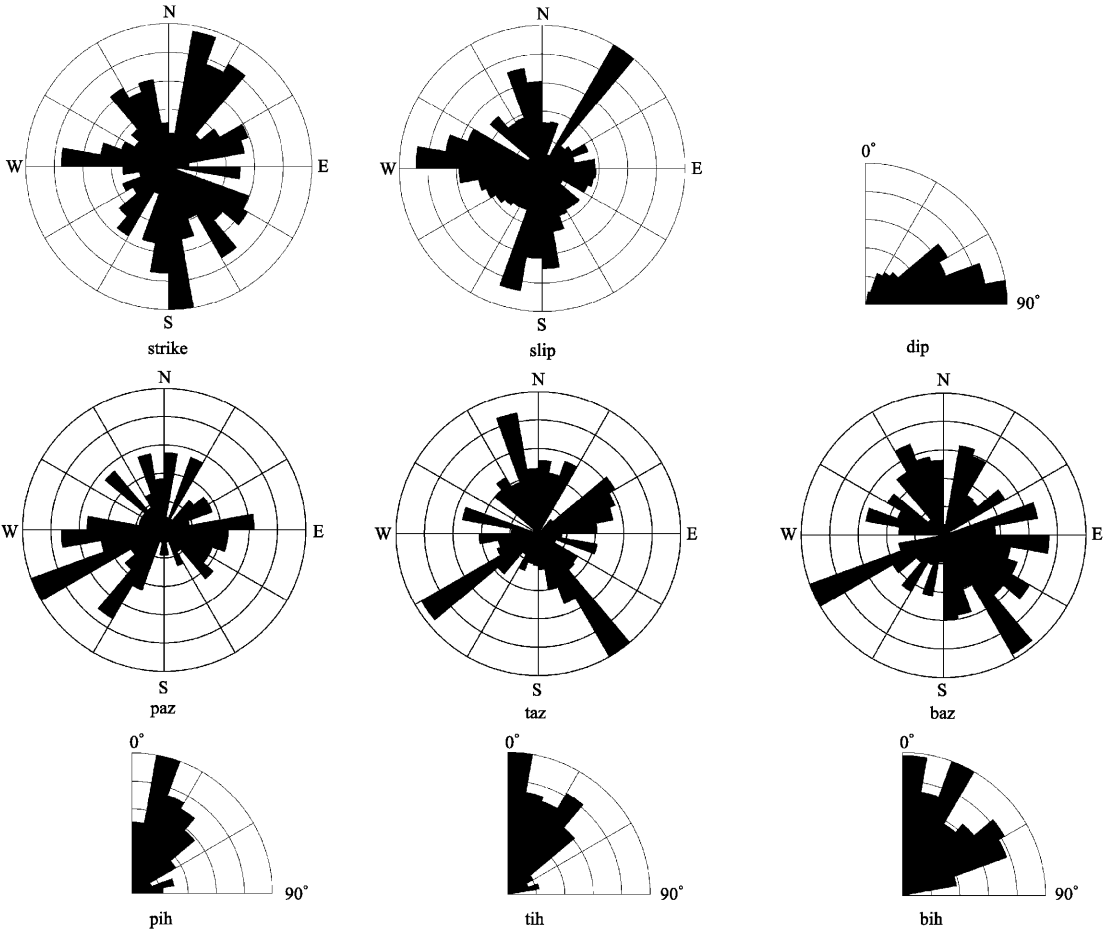


图 2 145 个震源机制解节面参数和 P、T、B 力轴参数分析
Fig. 2 Nodal plane and P, T and B axis parameters analyze of the focal mechanism solutions of 145 earthquakes

整体上讲,研究区震源断层面 strike 主要呈现 NNE 向与 NWW 向两组节面走向,其中 NNE 向节面呈现为 $N10^{\circ}\sim40^{\circ}E$,其它各个方向也都有,次数较少;滑动角 slip 在 0° 和 180° 附近居多,表明震源机制解以走向滑动为主,同时倾斜以及倾向滑动的都存在,相比之下正断层(左)比逆冲断层(右)要多,说明研究区拉张作用比挤压作用强烈;断面倾角 dip 显示高倾角较多,接近水平的倾角几乎为零,表明断层面或直立或倾斜;主压应力 P 轴方位近 NEE 向,倾角 $10^{\circ}\sim30^{\circ}$,接近水平;主张应力 T 轴的优势方向主要集中在 NNW 向和 NEE 向,倾角在 $0^{\circ}\sim50^{\circ}$ 范围内较多;中等应力 B 轴方位可以勾画破裂方位,以 NEE 与 NNW 为多,倾角分布比较均匀,说明滑动方式比较离散,规律不明显。

由于地震震级较小,随机发生的可能性较大,受局部影响程度高,而且数量多,无法一一比较,为了更清晰地分析这些震源机制解的异同,笔者采用模式识别中系统聚类的方法(刁桂苓等,1992,1995)进行深入的分析。

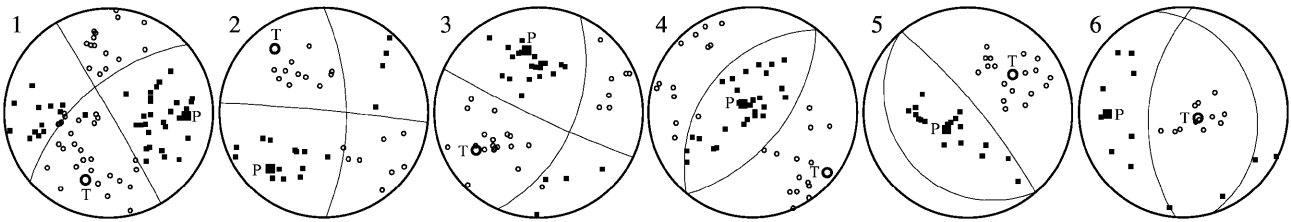


图3 研究区各种类型震源机制解的 P、T 轴参数和平均解投影

Fig. 3 P and T axis of focal mechanism different type of solution and projections of their average solution

表1 研究区不同震源机制类型各平均轴参数

Tab. 1 Average stress axis parameters of different type of focal mechanism solutions in study area

Type	Paz/($^{\circ}$)	Pih/($^{\circ}$)	Taz/($^{\circ}$)	Tih/($^{\circ}$)	Baz/($^{\circ}$)	Bih/($^{\circ}$)	Xaz/($^{\circ}$)	Xih/($^{\circ}$)	Yaz/($^{\circ}$)	Yih/($^{\circ}$)	AlfaPT/($^{\circ}$)	N
1	92.30	73.05	199.65	67.98	331.88	31.04	239.70	88.69	139.11	59.59	81.07	43
2	223.67	72.62	321.95	75.24	88.56	3.84	269.47	66.17	185.31	87.03	86.75	19
3	349.10	61.95	239.83	69.17	121.22	38.47	25.01	85.09	293.39	51.79	83.98	26
4	307.63	12.42	128.35	85.60	38.34	89.84	308.23	55.61	128.53	39.51	81.98	27
5	229.98	29.71	49.80	57.82	139.85	89.92	229.86	79.53	49.60	17.35	87.53	18
6	268.38	72.51	109.65	16.30	0.14	84.42	94.43	52.53	255.25	20.81	87.77	12

2.2 地震类型与断裂之间的分布关系分析

为了更好地分析研究区地震类型分布与断裂之间的相互关系,笔者把震源机制解系统聚类分析结果分别投影在研究区断裂构造图上(图4):图4a为第1、2类(主类)走滑型地震的分布图,震源平均深度为14.4 km;图4b为第3类走滑型地震的分

2.1 震源机制解系统聚类分析

对于研究区范围内的145个震源机制解,采用最大距离法进行系统聚类划分后将其划分为6类(图3):前3类的平均解都是走向滑动,后3类的平均解为倾向滑动,其中第4、5类为正断解,第6类为逆断解。正断解总的数目是逆断解的近4倍,走向滑动地震数目约占总数的61%,倾向滑动地震数目约占总数的39%。第1类的P轴平均方位是EW,第2类的P轴平均方位是NE,这两类最大主压应力P轴方位与谢智等(2002)、闫俊岗等(2008)对晋冀鲁豫及邻区地震的震源机制解研究所得的结论一致,因此这两类可视为代表区域的主体,我们称之为主体类;第3类的P轴平均方位是NNW,在N向附近摆动。倾滑地震数目占总数的39%,表明除了主体走滑活动外,随机或者调整性的倾滑活动比重也较大。

表1是各类平均解的参数,其中az表示应力轴的方位,ih表示应力轴和铅垂线的夹角,X、Y分别是节面,AlfaPT是P、T轴的平均夹角,用于衡量平均解的质量,90°最好,末栏是该类解的数目。

布图,震源平均深度为15.5 km;图4c为第4、5类正断型地震的分布图,震源平均深度为14.8 km;图4d为第6类走滑逆断型地震的分布图,震源平均深度为21.1 km。由图4可以看出,总体上正断型与走滑型地震分布较为散乱,其中邢台—邯郸断裂、林县西断裂附近多为正断及走滑型地震,磁县—大名

断裂附近正断、走滑型、逆断型地震都存在，但是正断型及走滑型地震占多数，与地质资料上邢台—邯郸断裂、林县西断裂为正断层（漆家福，1985），磁县—大名断裂的性质为正断层兼走滑相结合，安阳南断裂周围地震很少的结论较一致。以上分析表明研究区活动断裂如林县西断裂、磁县—大名断裂等局部对地震具有一定的控制作用。此外，不同类型地震震源深度均值表明研究区逆断型地震震源深度要深于正断型及走滑型地震的发震深度，同时逆断型地震主要聚集在林县西断裂、磁县—大名断裂以及紫山西断裂的交汇部位，推测逆断型地震的

发生与深部断裂之间的相互挤压作用有关，需要深部的构造应力场的更复杂作用，有待对其进行进一步的动力学研究。

3 区域构造应力场反演

为了进一步了解研究区现今构造应力场的方向特征，笔者利用所得到的 145 个中小地震的震源机制解，采用格点尝试法（许忠淮等，1983）对研究区现今构造应力场的方向特征（周仕勇等，2001）进行了研究。

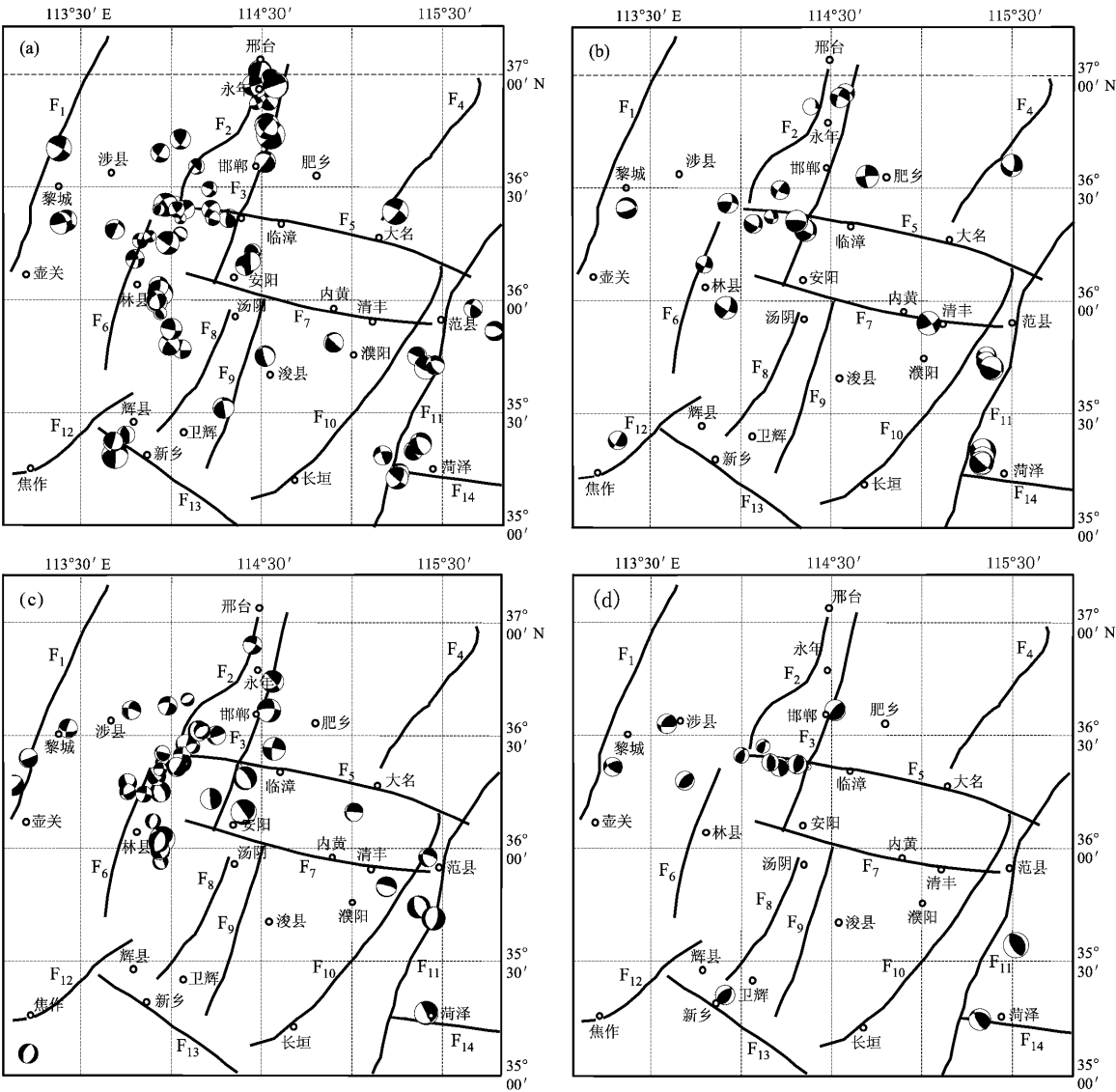


图4 研究区不同类型震源机制解分布图

(a) 第1、2类走滑型地震；(b) 第3类走滑型地震；(c) 第4、5类正断型地震；(d) 第6类逆断型地震

Fig. 4 Distribution of each kind of the focal mechanism solutions

(a) The first and second strike-slip type; (b) The third strike-slip type;

(c) The fourth and fifth normal type; (d) The sixth inverse type

笔者依据主类震源机制解数据,把研究区内每个主类震源机制解的P、T轴分别当成是向下和向上的“初动符号”(范俊喜等,2003),利用格点尝试法进行了计算,求解了研究区的平均震源机制解和相应的P、B、T轴(图5),具体参数列于表2。

由图5与表2可以看出,研究区主类震源机制解平均解呈现走滑型应力特征,即最大主应力轴P、最小主应力轴T倾角皆为18°,比较接近水平,B轴倾角为64°为近垂直,P轴方位82°,为北东东向,T轴方位346°,为北北西向;两个节面走向分别为北北东和北西西方向。

从整体上看,研究区平均震源机制解P、T轴与节面走向分布结果与李钦祖(1980)、许忠淮等(1983)、李瑞莎(2008)、徐纪人等(2008)对该区构造应力场的研究比较一致;豫北及邻区处于北东东—南西西方向的水平压应力和北北西—南南东方向的水平张应力为特征的现代构造应力场作用之下。由此可以认为,研究区所发生地震的构造断层

是以走滑或近走滑运动特征为主的,说明地震的应力作用方式是以水平和近水平力的推扭。

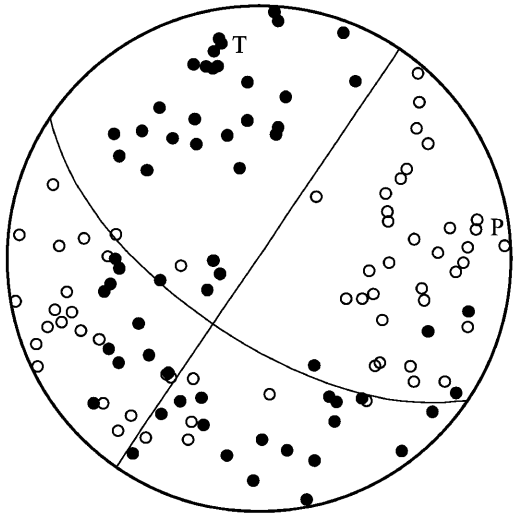


图5 研究区主类平均解图
Fig. 5 Average solution of main type in study area

表2 由格点尝试法给出的研究区主类平均主应力轴参数													
节面 A			节面 B			P 轴		T 轴		B 轴		最低矛盾比	
走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	方位/(°)	倾角/(°)	方位/(°)	倾角/(°)	方位/(°)	倾角/(°)		
214	90	-154	124	64	0	82	18	346	18	215	64	19%	

4 结论及讨论

本文收集并整理了1985~2008年豫北及邻区发生的数字地震波资料,在研究区最新的速度结构和地震精定位结果基础上,进行了震源机制解的重新计算、系统聚类分析以及区域应力场研究。通过对计算所得的145个地震震源机制解聚类及应力场分析,得到研究区震源机制解以走滑类为主,应力轴比较接近水平,研究区构造应力场以水平挤压为主要特征,处于北东东—南西西方向的水平压应力和北北西—南南东方向的水平张应力为特征的现代构造应力场作用之下。由此可以认为,研究区所发生地震的构造断层是以走滑或近走滑运动特征为主的,区内地震发生的应力作用方式是以水平和近水平力的推扭。

研究区震源机制解除走滑型外,还有一定数量的正断层和逆断层类型。整体显示中小地震震源机制解种类较多,分布散乱,表明小地震发生

具有随机性,受局部因素影响较大,华北构造应力场整体的控制作用较弱。

地震类型与断裂之间的分布关系表明研究区活动断裂如林县断裂、磁县—大名断裂等局部对地震具有一定的控制作用。不同类型地震震源深度值表明研究区逆断型地震发震深度层要深于正断类及走滑类地震的发震深度,推测逆断型地震的发生需要深部的构造应力场的更复杂作用。

华北强震的震源机制与构造应力场具有一致性(李钦祖,1980),说明强震是大范围应力积累释放的表现形式,中小地震发生具有随机性,受局部因素影响较大。当它们的震源机制散乱时,大体认为构造应力的作用较小,是相对安全的一种显示(闫俊岗等,2008)。

本文资料由邯郸中心地震台闫俊岗工程师提供了部分震源机制解的初始数据;河北省地震局刁桂苓研究员提供了震源机制、相关聚类以及应力场分析软件,在震源机制解与应力场计算分析

及结果解释等方面给予了详细指导。在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 1992. 震源机制解的系统聚类分析—以海城地震序列为例[J]. 中国地震, 8(3): 86–92.
- 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 1995. 大同两次 $M_s 5.8$ 地震序列的震源区应力场对比分析[J]. 地震, (2): 345–352.
- 刁桂苓, 赵英萍, 啜永清, 等. 2004. 大同晚期强余震前震源机制解的一致性特征[J]. 内陆地震, 18(3): 202–206.
- 杜广仁. 1998. 豫北地区地震活动性及其与区域地壳运动的关系[J]. 地震研究, 21(1): 82–87.
- 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[J]. 地震地质, 25(1): 88–99.
- 付淑芳, 刘宝城, 李文艺. 1980. 地震学教程(下册)[M]. 北京: 地震出版社.
- 胡新亮, 刁桂苓, 马瑾, 等. 2004. 利用数字地震记录的 p, s 振幅比资料测定小震震源机制解的可靠性分析[J]. 地震地质, 26(2): 348–353.
- 李钦祖. 1980. 华北地壳应力场的基本特征[J]. 地球物理学报, 23(4): 376–388.
- 李瑞莎. 2008. 利用大量震源机制解初步分析华北地区现今构造应力场的非均匀特征[D]. 北京: 中国地震局地壳应力研究所.
- 梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镒, 等. 1984. 利用区域地震台网 P, S 振幅比资料测定小震震源参数[J]. 地球物理学报, 27(3): 247–257.
- 林纪曾, 李幼铭. 1991. 粤东、闽南沿海小震震源参数的研究[J]. 地震学报, 13(4): 420–429.
- 漆家福. 1985. 林县盆地新生代伸展构造, 现代地壳运动研究[M]. 北京: 地震出版社.
- 王曰风, 刁桂苓, 张秀萍, 等. 2008. 2001年云南永胜 6.0 级地震余震序列震源机制解与震源区应力场分析[J]. 地震研究, 31(2): 119–123.
- 谢智, 刘尧兴, 胡卫建, 等. 2002. 河南及邻区地震的震源机制[J]. 西北地震学报, 24(3): 283–286.
- 莘海亮, 方盛明, 张元生, 等. 2011. 安阳及邻区三维地壳速度结构研究[J]. 地球物理学进展, 26(5): 1535–1543.
- 莘海亮, 方盛明, 李稳. 2011. 豫北及邻区地震双差法重新定位研究[J]. 大地测量与地球动力学, 31(6): 63–68.
- 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[J]. 地球物理学报, 51(3): 770–781.
- 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[J]. 地震学报, 5(3): 268–279.
- 闫俊岗, 王利兵, 孙喆. 2008. 晋冀鲁豫相邻地区中小地震震源机制特征分析[J]. 山西地震, (4): 1–7.
- 张成科, 赵金仁, 任青芳, 等. 1994. 豫北及其外围地区地壳上地幔结构研究[J]. 地震地质, 16(3): 442–449.
- 张永久, 程万正. 2007. 用 \bar{P}, \bar{S} 波速度振幅比求小震机制解的可行性研究[J]. 中国地震, 23(4): 366–374.
- 张致伟, 张永久, 程万正, 等. 2010. 汶川 8.0 级地震序列的小震震源机制及应力场特征[J]. 地震研究, 33(1): 43–49.
- 周仕勇, 许忠淮, 陈晓非. 2001. 伽师强震群震源特征及震源机制力学成因分析[J]. 地球物理学报, 44(5): 654–662.

Focal Mechanism Solution and Stress Field Inversion of Small and Moderate Earthquakes in North Henan and its Adjacent Region

XIN Hai-liang, FANG Sheng-ming, FAN Ji-chang, LI Wen

(Geophysical of Exploration Center, CEA, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract

Based on the data of digital seismic wave recorded by regional seismic network from 1985 to 2008, the focal mechanism solutions of 145 small and moderate earthquakes which occurred in North Henan and its adjacent region were determined by the amplitude ratio of P_g and S_g in vertical component records with clear initial motion of P -wave. Using the methods of statistic, systematic cluster analysis and grid point test, we analyze the parameters of focal mechanism solutions and calculate the regional mean stress field. The results show that the mainly focal mechanism solutions is strike-slip type, the main stress axis is close to horizon and the main characteristic of the regional tectonic stress field is characterized by horizontal compression in study area. There are some normal and reverse fault types beside of strike-slip type for focal mechanism solutions. On the whole the focal mechanism solutions of small and moderate earthquakes have many types and scattering distribution, which indicates that small earthquakes occurred in random, and the whole controlling of tectonic stress field of North China is weak.

Key words: small and moderate earthquakes; focal mechanisms; cluster analysis; stress field; North Henan and its adjacent region