

利用小震震源机制解研究宁夏南部及邻区构造应力场^{*}

曾宪伟¹, 莘海亮², 陈春梅¹, 蔡新华¹

(1. 宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001; 2. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 利用垂直向 Pg 和 Sg 波振幅比方法计算了 2003 年 1 月至 2009 年 10 月间宁夏南部及邻区的 40 个中小地震的震源机制解, 然后对计算所得的 40 个地震的震源机制解进行系统聚类及应力场分析, 利用格点尝试法研究灵武—吴忠地区 (I 区) 和宁夏南部地区 (II 区) 的平均震源机制解。结果表明: 该区域主要受北东东向压应力作用而形成右旋走滑型断层, 同时又带有张性分量; I 区域构造应力场主压应力方向以水平作用为主, 地震产生的震源区构造变形是北东向发生压缩, 北西向发生相对扩张; II 区域构造应力场主压应力方向以水平作用为主, 地震产生的震源区构造变形是北东东向发生压缩, 北北西向发生相对扩张。

关键词: 宁夏南部及邻区; 中小地震; 震源机制; 构造应力场; 系统聚类法

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)01-0051-07

0 引言

地壳构造应力场是地球动力学研究的核心问题之一 (陈连旺等, 1999), 对其研究将有助于探讨地震的成因、分析断层的活动方式和活动性质 (武敏捷, 2006; 李瑞莎, 2008)。震源机制解是研究构造应力场的基本资料, 可以反映震源断层的力学性质和动力学特征, 揭示地震破裂的力学机制, 给出地震的等效释放应力场。在双力偶点源模式的震源机制解中, P、N 和 T 轴一直被用来作为推断地下应力场状况的主要依据之一。但单个地震的 P、N 和 T 轴并不一定代表地震所在区域的构造应力场 (McKenzie, 1969; Yamakawa, 1971), 许多学者利用多个地震的震源机制解结果或多个断层面滑动方向来反演地震分布区域的构造应力场 (Ellsworth, Xu, 1980; 许忠淮等, 1983; Michael, 1987; 曹颖等, 2013)。

随着宁夏及邻区震源机制资料的积累, 自 20 世纪 80 年代以来, 对该地区区域构造应力场的研究逐渐丰富 (李玉龙, 1979; 陈爱玲等, 1981; 李孟奎, 赵知军, 1986; 赵知军, 刘秀景, 1990)。但以往研究成果大多基于模拟测震台站记录的资料, 相对于数字地震观测资料, 前者记录频带窄、动态范围小, 震相识别及振幅量取的可

靠性均较后者要差。宁夏测震台站数字化改造后, 产生了海量的数字化地震观测资料, 这部分资料的利用程度还很低, 更鲜用于计算宁夏地区中小地震的震源机制解。而对于计算中小地震震源机制解的方法, 较多地采用两种方法。一种采用 P 波初动, 该方法对台站布局和台站数量依赖性较强; 另一种采用初动符合与垂直向 SV/P 的振幅比结合 (梁尚鸿等, 1984), 或初动符合与水平向 SH/P 的振幅比结合 (吴大铭等, 1989), 或者利用 P、SV 和 SH 波的初动和振幅比联合的 Snoke 方法 (Snoke *et al.*, 1984; Snoke, 1989), 抑或利用 P 波初动极性和 S/P 振幅比联合的 HASH 方法 (Hardebeck, Shearer, 2002, 2003)。第二种方法相对于第一种方法大大降低了对台站布局 and 大量 P 波初动的依赖程度。本文拟采用初动符号和垂直向 SV/P 的振幅比联合方法 (梁尚鸿等, 1984) 计算 2003~2009 年宁夏南部及邻近地区数字测震台站运行期间记录的中小地震的震源机制解。该时间段正好是“九五”数字测震台站运行期间, 台站数较少 (只有 7 个), 之后增至 13 个, 因此, 本文仅分析该时间段内的计算结果。然后通过系统聚类方法 (刁桂苓等, 1992) 分区分析该地区震源机制解的时空特征, 并采用格点尝试法 (许忠淮等, 1983; 许向彤等, 1995) 求取分区多个地震的平均节面解, 据此推断该区域的平均构造应力场方向。

^{*} 收稿日期: 2014-02-12.

基金项目: 地震科技星火计划 (XH12054Y) 和地震行业专项 (201208009) 联合资助.

1 方法与原理

梁尚鸿等 (1984) 提出利用区域地震台网垂直分量的 P_g 和 S_g 波位移振幅比资料测定小震震源机制。仪器记录的直达 P 波和 S 波垂直分量最大值振幅比 (Q_l) 的对数可以表示为

$$Q_l = \ln \left| \sum_{m=0}^2 A_m(\theta_s, \lambda, \delta) SV_m \right| - \ln \left| \sum_{m=0}^2 A_m(\theta_s, \lambda, \delta) \cdot P_m \right| + C_l, \quad (l = 1, 2, \dots, N). \quad (1)$$

$$\text{其中} \begin{cases} A_0(\theta_s, \lambda, \delta) = \frac{1}{2} \sin 2\delta \cdot \sin \lambda, \\ A_1(\theta_s, \lambda, \delta) = \cos \delta \cdot \cos \lambda \cdot \cos \theta \\ \quad + \cos 2\delta \cdot \sin \lambda \cdot \sin \theta, \\ A_2(\theta_s, \lambda, \delta) = \frac{1}{2} \sin 2\delta \cdot \sin \lambda \cdot \cos 2\theta \\ \quad - \sin \delta \cdot \cos \lambda \cdot \sin 2\theta. \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_0 = \frac{2 - 3 \sin^2 i_h}{\alpha_s^2}, & \begin{cases} SV_0 = \frac{i \frac{3}{2} \sin 2i_h}{\beta_s^2}, \\ SV_1 = \frac{i(2 \sin^2 i_h - 1)}{\beta_s^2}, \\ SV_2 = -\frac{i \sin 2i_h}{\beta_s^2}. \end{cases} \\ P_1 = \frac{\sin 2i_h}{\alpha_s^2}, \\ P_2 = \frac{\sin^2 i_h}{\alpha_s^2}. \end{cases}$$

式中, i_h 是离源角, $\theta_s, \lambda, \delta$ 分别为震源位错面的方位角、倾角和滑动角, α_s, β_s 分别为第 S 层介质中 P_g 和 S_g 波垂直波数, C_l 为依赖于台站位置的常数, 与震源参量无关。

设震源参数真值为 $\overline{\theta_s}, \overline{\lambda}, \overline{\delta}$, 记录台站数为 N , 那么各记录中相应的最大振幅比观测资料可表示为 $\overline{Q_l} = \overline{Q_l}(\overline{\theta_s}, \overline{\lambda}, \overline{\delta}) (l = 1, 2, \dots, N)$ 。如果层状介质中一点错震源的模型参数已知时, 则可通过 (1) 式计算得到理论振幅比 $Q_l (l = 1, 2, \dots, N)$ 。然后可以通过用理论最大振幅比值与相应观测资料拟合的方式求解震源机制参数。该方法具有对台站布局 and 大量 P 波初动依赖程度低等优点。林纪曾和李幼铭 (1991) 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给出令人满意的结果。胡新亮等 (2004)

的对比分析也进一步证实了利用数字地震记录的 P_g 和 S_g 振幅比资料测定小震震源机制解的可靠性。张永久和程万正 (2007) 研究结果表明, 利用数字地震记录直达 P_g 和 S_g 波最大速度振幅比和仿真后的最大位移振幅比资料测定的同一地震的震源机制参数具有较好的一致性。因此, 我们可以采用该方法直接量取直达 P_g 和 S_g 波最大速度振幅比测定小震震源机制参数, 从而有效地利用小震资料, 为进一步深入研究应力场提供丰富的小震震源机制参数资料。

2 资料处理

利用垂直向直达波初动和波振幅比计算中小地震震源机制解的过程中, 要求所选取的地震至少有 4 个台站的资料可以提供计算, 并且至少可以查到一个台站记录有清楚的 P 波初动方向。由此, 本文选取 2003 年 1 月至 2009 年 10 月宁夏数字地震台网记录到的宁夏南部及邻区 40 个 $M_L \geq 3$ 地震 (图 1), 利用穿过宁夏地区的 4 条人工地震测深结果 (杨明芝等, 2007) 抽取计算所需的地壳速度模型 (表 1), 然后量取垂直向直达 P、S 波最大振幅。此处需要说明的是, 为避免将 P_n 震相误识为 P_g 震相, 资料选取震中距小于 200 km 的记录波形; 为避免 P_{11} 等震相混入 P_g 震相, 只需在 P_g 和 S_g 到达的前几个周期内量取最大振幅即可。最后计算各地震震源机制解, 震源机制类型及分布见图 2 (下半球投影)。

根据 I 级活动地块 (邓起东等, 2002) 划分结果和宁夏地区区域地质构造分布情况, 将研究范围 ($35^\circ \sim 39^\circ \text{N}$, $104^\circ \sim 108^\circ \text{E}$) 划分为两个区 (图 1), 分别为灵武—吴忠地区 (I 区, 图 1 中虚线所围区域) 和宁夏南部地区 (II 区, 图 1 中下虚线以南区域, 东、西以 I 级活动地块边界为界, 粗实线为 I 级活动地块边界, 细黑线为断层), 并分别研究两个分区内 P 轴、T 轴的优势分布方向以及各分区构造应力场的特点。

表 1 研究区域地壳速度模型

Tab. 1 The crustal velocity model in the study region

每层厚度/km	$V_s/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
0 ~ 3	2.81	4.80
3 ~ 21	3.49	6.00
21 ~ 34	3.68	6.30
34 ~ 45	3.91	6.80

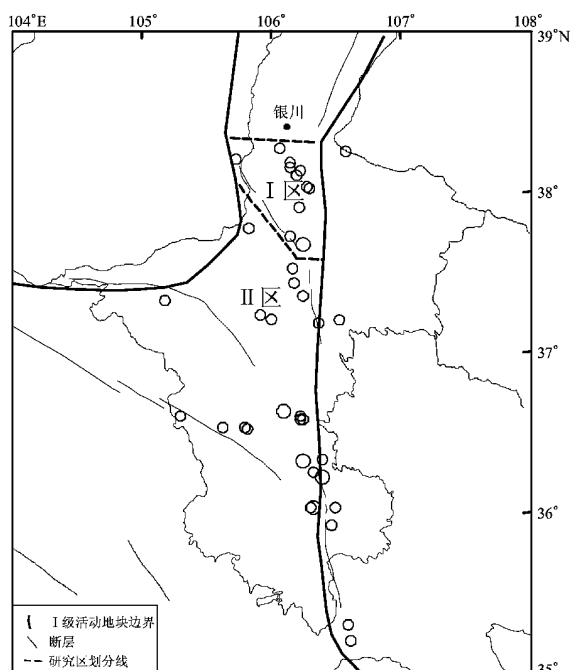


图 1 研究区内的地震震中分布

Fig. 1 Distribution of epicenters in the study region

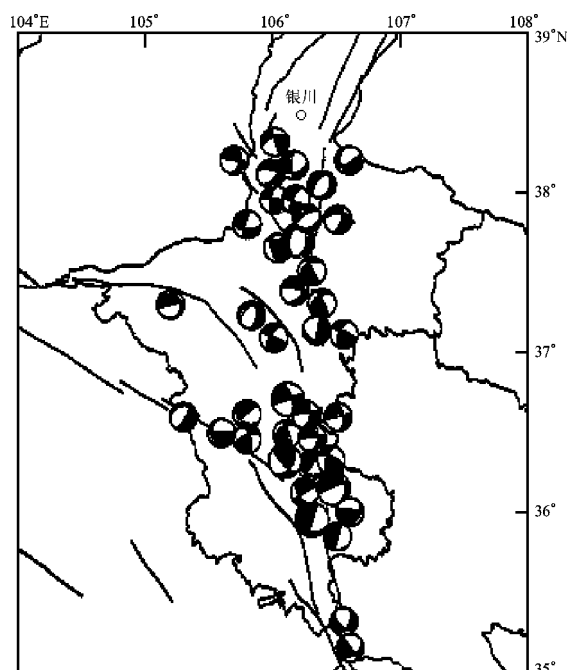


图 2 研究区内的地震震源机制解

Fig. 2 Distribution of focal mechanisms in the study region

3 结果分析

3.1 系统聚类分析

采用最长距离法 (刁桂苓等, 1992), 对宁夏南部及邻区的 40 个地震震源机制解进行聚类分析, 聚类后主要划分为 3 类 (图 3, 表 2), 有 2 个地震的震源机制解较难聚类, 且样本量较少, 此处不予讨论。类型 (a) 和类型 (c) 均为走滑型, 但主压应力的方向成 90° 左右夹角, 而且后者所包含的震源机制解数目仅为前者的 1/3。因此, 类型 (a) 所代表的断层错动类型和应力场

的方向占主导地位。从图 3a 震源机制平均解结果看, 走滑型地震主要受北东东向近水平的主压应力和北北西向近水平的主张应力作用。类型 (b) 显示为正断兼走滑型, 平均解给出的主压应力 P 轴方位和主张应力 T 轴方位分布为 358° 和 112° , 仰角前者大后者小, 表明区域断层受近南北向的近垂直压力和近东西向的水平张力作用, 但正断型应力结构所包含的震源机制解数目仅占总数的 25%, 为走滑型应力结构所包含的震源机制解数目的 1/3 强。综合来看, 该区域主要受北东东向压应力作用而形成右旋走滑型断层, 同时又带有张性分量。

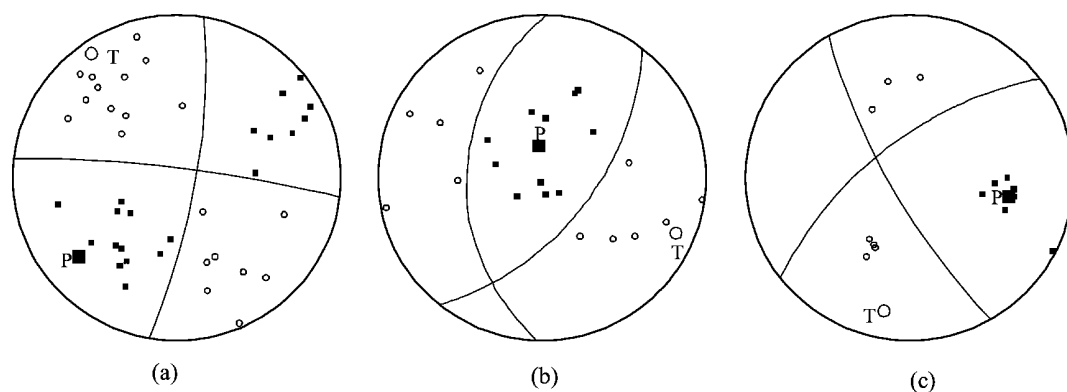


图 3 研究区中小地震震源机制解聚类分析给出的 3 种类型平均解

Fig. 3 Average solutions of 3 types of focal mechanism of the medium and small earthquakes in the study area by system clustering method

表 2 研究区 3 种类型的中小地震震源机制平均解参数 (单位: (°))

Tab. 2 Parameters of average solutions of 3 types of focal mechanism of the medium and small earthquakes in the study area

类型	P _{az}	P _{ih}	T _{az}	T _{ih}	N _{az}	N _{ih}	X _{az}	X _{ih}	Y _{az}	Y _{ih}	Alfa _{PT}	No.
(a)	231	76	325	86	69	15	187	83	280	77	87	20
(b)	358	20	112	83	205	71	92	41	308	55	88	11
(c)	102	64	191	79	302	27	60	76	142	64	85	7

注: az 代表应力轴方位; ih 代表应力轴与铅垂线夹角; Alfa_{PT}代表平均 PT 轴的夹角; No. 代表震源机制解数目.

3.2 分区构造应力场分析

把所求区域内每个小震震源机制解的 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(许忠淮等, 1983)求解各研究区内的平均震源机制解和相应的 P、N、T 轴参数, 具体结果列于表 3.

表 3 利用格点尝试法给出的两个研究分区的平均震源机制解 (单位: (°))

Tab. 3 Average focal mechanism solutions of two research areas by grid testing method

研究分区	slip ₁	dip ₁	str ₁	slip ₂	dip ₂	str ₂	P _{az}	P _{ih}	T _{az}	T _{ih}	N _{az}	N _{ih}	R
I	-8	86	88	-176	82	178	43	8	133	3	245	81	0.08
II	-161	76	198	-15	72	104	62	23	331	3	234	67	0.23

注: R 表示矛盾符号比.

3.2.1 灵武—吴忠地区 (I 区)

将灵武—吴忠研究区内有节面解的 12 个地震不分震级大小, 采用统计分析方法, 按每 10°间隔进行归一化频数计算, 分别绘制震源机制 P、T、N 轴方位和仰角以及节面走向、倾角和滑动角玫瑰图(图 4). 该研究区内节面优势方向分布近南北向. 由滑动角分布看, 该区域发生地震以正断错

动类型为主. 节面倾角分布表明发震断层倾角主要分布在 40°~60°之间. 由图 4 可知, 主压应力 P 轴总体优势方向为 NNE50°~60°, P 轴仰角主要分布在 50°~60°之间; 主张应力 T 轴总体优势方向为 SSE30°~40°和 NNW60°~70°, T 轴仰角较小, 主要分布在 0°~30°之间; 中间主应力 N 轴有两个明显的优势分布方向, 分别为近北东向和近北西

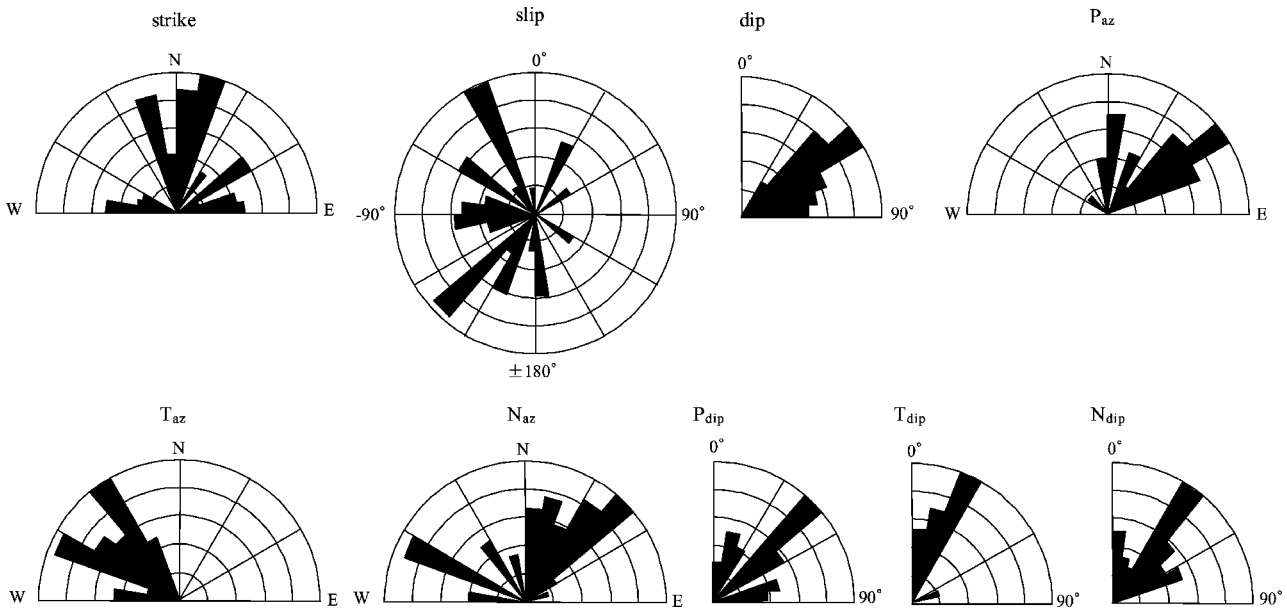


图 4 灵武—吴忠地区 (I 区) 震源机制 P、T、N 轴方位和仰角及节面解玫瑰图

Fig. 4 Azimuth, elevation angles and rose diagram of nodal plane solutions of P, T, N axis of focal solution in Lingwu-Wuzhong region (I area)

向, N 轴仰角主要分布在 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间。由此说明, 该区域地震产生的震源区构造变形是近北东向发生压缩, 近北西向发生相对扩张。

笔者利用格点尝试法求解灵武—吴忠地区 12 个地震的平均震源机制解 (图 5), P 轴方位为 NE 向, T 轴方位为 SE 向, N 轴近垂直。由此推断, 该区域构造应力场主应力方向以水平作用为主, 地震产生的震源区构造变形是北东向发生压缩, 北西向发生相对扩张。

3.2.2 宁夏南部地区 (II 区)

以同样的方法对宁夏南部地区有节面解的 28 个地震, 分别绘制震源机制 P、T、N 轴方位和仰角以

及节面走向、倾角和滑动角玫瑰图 (图 6)。该研究区内节面有 3 个较明显的优势分布方向, 分别为近南北向、近东西向和近北东向。由滑动角分布看, 该区域发生地震以正断错动类型为主, 也有逆断错动。节面倾角分布表明发震断层多为近垂直向。由图 6 可以看出, 主压应力 P 轴总体优势方向为近东西向 $SSW30^{\circ} \sim 40^{\circ}$, P 轴仰角主要分布在 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间; 主张应力 T 轴总体优势方向为近北东向, T 轴仰角主要分布在 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间; 中间主应力 N 轴有两个明显的优势方向, N 轴仰角主要分布在 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间。由此说明, 该区域地震产生的震源区构造变形是近北东向发生压缩, 近北西向发生相对扩张。

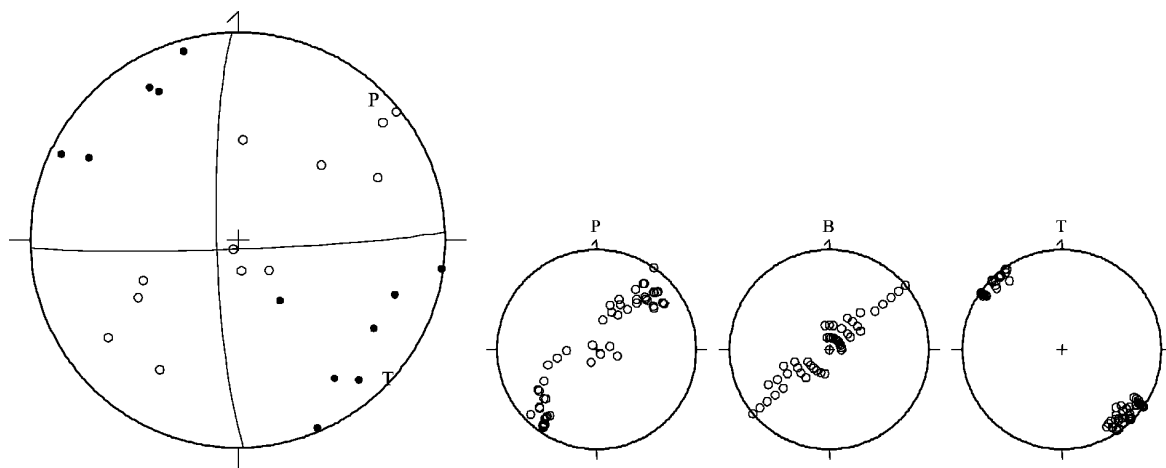


图 5 灵武—吴忠地区 (I 区) 震源机制平均解

Fig. 5 Average focal mechanism solutions in Lingwu-Wuzhong region (I area)

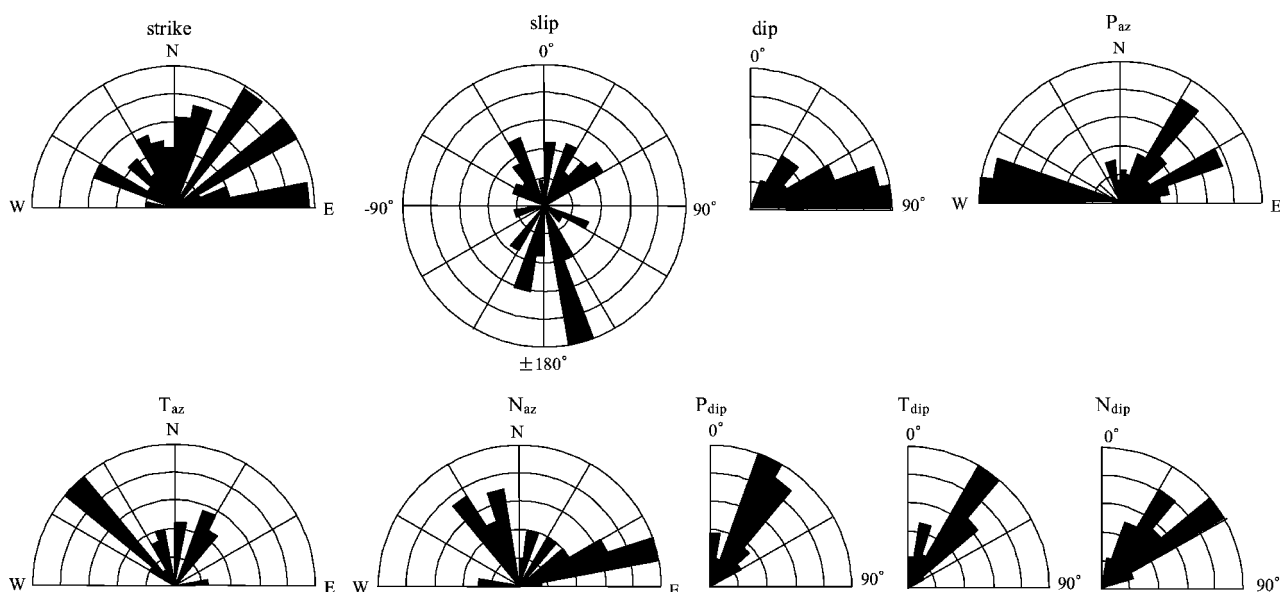


图 6 宁夏南部地区 (II 区) 震源机制 P、T、N 轴方位和仰角及节面解玫瑰图

Fig. 6 Azimuth, elevation angles and rose diagram of nodal plane solutions of P, T, N axis of focal solution in southern Ningxia region (II area)

利用格点尝试法求解宁夏南部地区 28 个地震的平均震源机制解 (图 7), P 轴方位为 NEE 向, T 轴方位为 NNW 向, N 轴近垂直。由此推断, 该

区域构造应力场主应力方向以水平作用为主, 地震产生的震源区构造变形是北东东向发生压缩, 北北西向发生相对扩张。

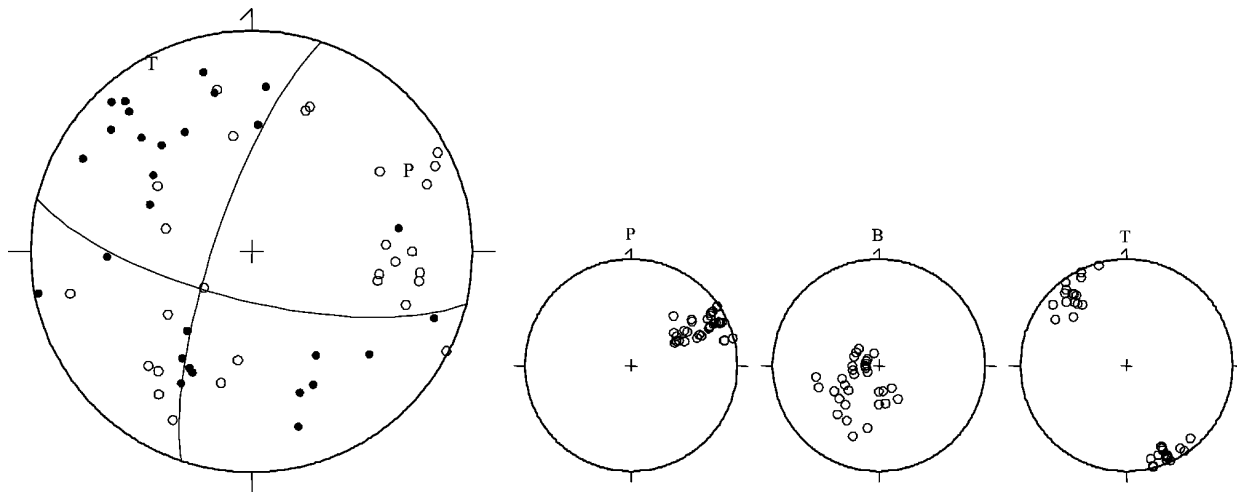


图 7 宁夏南部地区 (II 区) 震源机制平均解

Fig. 7 Average focal mechanism solutions in southern Ningxia region (II area)

4 结论与讨论

本文首先利用垂直向 Pg 和 Sg 波振幅比方法计算了 2003 年 1 月至 2009 年 10 月间宁夏南部及邻区的 40 个中小地震震源机制解, 然后对计算所得的 40 个地震震源机制解进行系统聚类及应力场分析, 并利用格点尝试法分区研究不同区域的平均震源机制解。本文给出的结果与前人对该区域的研究结果 (陈爱玲等, 1981; 李孟奎, 赵知军, 1986; 赵知军, 刘秀景, 1990) 基本一致。本文具体结论如下: (1) 系统聚类显示该区域走滑型应力结构所包含的震源机制解数目占总数的 75%, 为正断型应力结构所包含的震源机制解数目的 3 倍。综合来看, 该区域主要受北东东向压应力作用而形成右旋走滑型断层, 同时又带有张性分量。(2) 灵武—吴忠地区 (I 区域) 构造应力场主压应力方向以水平作用为主, 地震产生的震源区构造变形是北东向发生压缩, 北西向发生相对扩张。(3) 宁夏南部地区 (II 区域) 构造应力场主压应力方向以水平作用为主, 地震产生的震源区构造变形是北东东向发生压缩, 北北西向发生相对扩张。

河北省地震局冯向东高级工程师提供了计算

软件, 格点尝试使用了许忠淮教授编写的程序, 两位评审专家提出了建设性的修改意见, 在此一并致谢。

参考文献:

- 曹颖, 吴小平, 沈娅宏, 等. 2013. 由震源机制解资料研究川滇地区构造应力场[J]. 地震研究, 36(2): 165-172.
- 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[J]. 西北地震学报, 3(2): 31-38.
- 陈连旺, 陆远忠, 张杰, 等. 1999. 华北地区三维构造应力场[J]. 地震学报, 21(2): 140-149.
- 邓起东, 张培震, 冉永康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D 辑), 32(12): 1020-1030.
- 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.
- 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.
- 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[J]. 地震研究, 9(3): 299-314.
- 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性特征[D]. 北京: 中国地震局地壳应力研究所.
- 李玉龙. 1979. 陕甘宁青四省区新构造与现代构造应力场及其动力来源的初步分析[J]. 西北地震学报, 4(1): 1-10.
- 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.
- 吴大铭,王培德,陈运泰. 1989. 用 SH 波和 P 波振幅比确定震源机制解[J]. 地震学报,11(3):275-278.
- 武敏捷. 2006. 基于震源机制解的地震序列及区域应力场特征研究[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所.
- 许向彤,许忠淮,张东宁. 1995. 求震源机制 P 波初动解的格点尝试概率法[J]. 地震地磁观测与研究,16(4):34-42.
- 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.
- 杨明芝,马禾青,廖玉华. 2007. 宁夏地震活动与研究[M]. 北京:地震出版社.
- 张永久,程万正. 2007. 用 Pg、Sg 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.
- 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[J]. 地震地质,12(1):31-46.
- Ellsworth W. L., Xu Z. H.. 1980. Determination of the Stress Tensor from Focal Mechanism Data [J]. EOS Trans Amer Geophys Union, 61:1117.
- Hardebeck J. L., Shearer P. M.. 2002. A New Method for Determining First-motion Focal Mechanisms [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 92: 2264-2276, doi 10.1785/0120010200.
- Hardebeck J. L., Shearer P. M.. 2003. Using S/P Amplitude Ratio to Constrain the Focal Mechanisms of Small Earthquakes [J]. BSSA. 93,2434-2444, doi 10.1785/0120020236.
- Mckenzie D. P.. 1969. The Relationship between Fault Plane Solution for Earthquakes and Directions of the Principal Stresses [J]. Bull. Seismol Soc. Am., 59:591-601.
- Michael A. J.. 1987. Use of Focal Mechanism to Determine Stress: A Control study [J]. Jour Geophys Res., 92(B1):357-368.
- Snoke J. A., Munsey J. W., Teague A. G., et al.. 1984. A Program for Focal Mechanism Determination by Combined Use of Polarity and SV-P Amplitude Ratio Data [J]. Earthquake Notes, 55(3):15-20.
- Snoke J. A.. 1989. Earthquake Mechanism [A]//James D E. Encyclopedia of Geophysics [C]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 239-245.
- Yamakawa N.. 1971. Stress Fields in Focal Regions [J]. Jour. Phys. Earth, 19:347-353.

Characteristics Research of Tectonic Stress in Southern Ningxia and its Adjacent Areas by Focal Mechanisms of Small Earthquakes

ZENG Xian-wei¹, XIN Hai-liang², CHEN Chun-mei¹, CAI Xin-hua¹

(1. *Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China*)

(2. *The Geophysical Exploration Center, CEA, Zhengzhou 450002, Henan, China*)

Abstract

Firstly, we calculated the focal mechanism solutions of 40 small and moderate earthquakes in southern Ningxia and its adjacent areas from Jan. 2003 to Oct. 2009 by the amplitude ratio method of Pg and Sg waves in vertical direction and did the system clustering of the calculated focal mechanism solutions to analyze the stress field. Secondly, we studied the average focal mechanism of Lingwu-Wuzhong region (I) and southern Ningxia region (II) by grid testing method. The results show that it is easy to develop dextral strike slip fault with stretching component in the study area under the compressive stress in NEE. The direction of principal compressive stress of tectonic stress field in I and II region is mainly horizontal. The structure deformations in the focal region caused by earthquake are compression in NE and expansion in NW in I region, and are compression in NEE and expansion in NNW in II region.

Key words: the southern Ningxia and its adjacent areas; small and moderate earthquakes; focal mechanism; tectonic stress field; system clustering method