

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2015.04.008

基于震源机制资料分析河套地震带的 应力场变化特征

韩晓明¹⁾ 刘 芳¹⁾ 张文韬²⁾ 李 娟¹⁾ 侯 迪¹⁾

1) 内蒙古自治区地震局, 呼和浩特 010010

2) 安徽省地震局, 合肥 230000

摘 要 从地质构造运动和 1970 年以来 $M_s \geq 4.0$ 地震的震源机制资料分析认为, 垂直差异性和水平剪切运动共同控制河套地震带的应力场, 使其表现出左旋剪切并具有较多的正走滑型断层机制解。根据平均力轴张量计算和自助线性反演结果, 河套地震带的最大主压应力方位为 $47^\circ \sim 52^\circ$, 作用方向 NE-SW; 最小主压应力方位 $313^\circ \sim 322^\circ$, 作用方向 NW-SE。平均力轴张量计算结果显示, 所辖次级块体的应力场特征并不完全一致, 临河盆地的应力场与河套地震带相协调, 呼包盆地的应力场表现出区域性差异, 压应力方向在包头地区出现顺时针偏转, 作用方向 NEE; 这种非均匀性的应力场分布特征可通过历史中强地震和近期中小地震的应力轴水平投影分布图像得到证实。2003 年以来, 河套地震带的震源机制一致性参数的时序曲线趋势下降, 这种有序变化更多地是由临河至乌海地区的震源机制一致性引起的, 表明该构造部位有可能成为未来应力高度积累和加速释放的优先场所。

关键词 河套地震带 震源机制解 应力场反演 一致性参数

中图分类号: P315.72*7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2015)04-1030-13

0 引言

应力场演变信息可通过多种方法获取, 例如地质构造形迹反演和地应变实地测量和反演计算等, 综合考虑观测技术、数据携带的信息量和计算过程的复杂程度等因素, 通过求解中强地震的震源机制或大量小震的综合断层面解仍是获取现今应力场变化的主要方法。

作为震源体的一种初级近似, 双力偶点源模型可以求解震源机制参数, 并给出 2 个互相正交的节面, 由于真实的震源力学特征与双力偶模型存在明显偏离 (Giardini *et al.*, 1985; 许忠淮, 1997), 双力偶点源模型不能完全确定实际的发震断层; 相对而言, 地震矩张量可更为准确地表达震源力学特征而被广泛地应用于震源机制求解, 并可根据 1 组地震的平均地震矩张量的主轴方向来推断所在区域的主应力方向。假定断层产状和基本结构保持固定, 那么满足滑动条件的应力张量就可以控制断层的滑动方向, 这是利用震源机制解定量表达应力场状态和确定断层主应力方向的基本假设 (Gephart *et al.*, 1984; Michael, 1984; 万永革, 2011)。本文根据震源机制解反演应力场的基本假设, 主要采用自助线性方法 (Michael, 1984) 和平均力轴张

[收稿日期] 2015-07-21 收稿, 2015-10-29 改回。

[基金项目] 中国地震局地震科技星火计划项目 (XH15010Y) 和内蒙古自治区应用技术与开发项目 (20120427) 共同资助。

量方法(程万正等, 2006; 钟继茂等, 2006)反演河套地震带的应力场。

根据已有研究(范俊喜等, 2003; 谢富仁等, 2004), 河套地震带应力场的张应力方位为 NNW, 压应力方位为 NE, 所辖个别次级构造单元具有相对独立的应力场特征, 其中包头至西山嘴凸起一带的压应力方位为 NNW, 应力场表现出非均匀性分布特征(盛书中等, 2015)。为考察河套地震带应力场的最新变化特征, 本文将根据历史中强地震和近期中小地震的震源机制解联合判定区域应力场。首先在系统归纳地质构造运动的框架下, 运用振幅比(梁尚鸿等, 1984; 刁桂苓等, 1992)和 CAP(Cut and paste)方法(Zhu *et al.*, 1996)对 2001—2012 年间的 $M_L \geq 2.8$ 地震进行震源机制测定并开展应力场反演, 结合研究区的地质构造运动性质, 从宏观动力成因和微观运动过程 2 方面剖析河套地震带的应力场演化特征。

1 构造应力场的背景特征

河套地震带位于内蒙古轴南侧, 经过中生代的剥蚀, 晚侏罗世末期燕山运动的强烈挤压以及白垩纪初期的沉降作用, 河套地震带的盆地形状日益明显(国家地震局“鄂尔多斯周缘活动断裂系”课题组, 1988)。晚更新世是河套地震带发展的重要阶段, 此时期内临河凹陷继续沉降, 白彦花和呼包盆地相对隆升, 使临河地区成为河套地震带的沉降中心, 上地壳拉伸作用加强, 导致了凹陷南边界鄂尔多斯北缘断裂的形成; 第四纪继承新近纪活动特点, 盆地继续沉降, 且山前断裂带的活动重心逐渐迁移至盆地, 并在狼山—色尔腾山、乌拉山和大青山山前形成广泛的 3 级台地、洪积扇和基岩断崖等地质景观, 河套地震带在第四纪的强烈活动对现今地貌的塑造具有重要意义, 对历史和现今的地震地质活动具有重要的控制作用(邓起东等, 1985; 国家地震局“鄂尔多斯周缘活动断裂系”课题组, 1988)。

由于两侧的阴山隆起和鄂尔多斯块体相对做左旋拉张运动, 使河套地震带的新构造运动形式在垂直差异运动的同时也做旋性剪切, 这种构造运动模式驱使边界断裂控制着带内的凸起或凹陷呈左行斜列, 这是带内多产出正断层和左旋走滑型震源机制的基本构造模式及主要力源。

2 思路和方法

本文首先运用振幅比和 CAP 方法进行震源机制求解, 然后通过应力场反演来确定研究区的平均应力场特征, 进而结合震源机制一致性参数的时空分析来获取河套地震带应力场的最新变化信息。

根据研究区台网分布现状, 并考虑到对震级下限的不同要求, 这里综合使用振幅比和 CAP 方法求解震源机制。1) 振幅比计算过程中, 运用层状介质中的点源位错模型计算合成地震图得到垂直向初至 P、S 波的位移振幅, 并将多个台站计算的垂直向 P、S 初至波的振幅比与观测的垂直向 P、S 初至波振幅比进行拟合来确定震源机制。为保证震源机制解的稳定性和可靠性, 实际操作中约定参与计算的台站数目为 5 个以上, 量取 P、S 初至波之后前几个周期的最大振幅, 读取精度控制在 0.2mm 以内, 记录振幅 > 0.5mm, 且不限幅。一般来讲, 震中距 < 100km 时可避免 P_n 、 P_{11} 、 S_n 、 S_{11} 等震相的混入和误读, 考虑到研究区台网布局现状, 为保证地震事件数目和足够多的台站参与计算, 这里限定震中距在 200km 之内, 而实际计算中震中距 > 100km 的地震所占比重较小。2) CAP 方法求解过程中, 挑选地震事件的 EVT 格式波形

记录,考虑到台站方位角的覆盖效果、波形信噪比和尽可能多的台站记录参与计算,首先将震中距在 150~500km 范围内的台站记录的仪器响应去除,将记录波形旋转至径向、切向和垂向后,分解为 Pnl 和 Snl 2 部分,用 4 阶带通滤波分别在 0.05~0.2Hz 和 0.05~0.1Hz 频段内对 Pnl 和 Snl 的噪声部分进行压制并赋予不同的权重,采用目前应用较为广泛和成熟的频率-波数方法(F-K)计算震中距的格林函数并得到合成地震图(Zhu *et al.*, 2002),然后将理论地震图和实际观测波形进行互相关,最终通过格点搜索方法进行震源机制反演求解。为削弱速度模型和地震定位不甚精确等因素对结果的影响,在进行波形互相关过程中赋予 Pnl 和 Snl 不同的权重且对两者采用不同的时移来保证反演结果的精确度。

基于上述震源机制求解,根据震源断层面解的空间取向和断层滑动方向,给出相应的力轴张量在地理坐标系的表达式,采用平均力轴张量计算方法(程万正等,2006;钟继茂等,2006),通过求解相应的本征方程计算出平均力轴张量及其主值。为验证结果的可靠性,对比使用自助线性方法(Michael, 1984)重新反演河套地震带的应力场,反演过程使用 Bootstrap 重复采样模拟原始数据来评估最佳应力张量的置信度,重采样次数设为 200。

在综合判定平均应力场特征的基础上,用一致性参数来定量表征应力场的一致性变化特征(陈颀,1978)。根据定义(程万正等,2006),一致性参数为震源机制 3 个力轴 P 、 T 、 B 和构造应力场 3 个力轴 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 之间夹角差值之和的平均值。因此,一致性参数可以表达应力场的有序和紊乱程度。如果定义 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 分别为上述 6 个力轴之间的 3 个夹角,则一致性参数

$$\bar{\theta} = \frac{1}{3}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

其中: $\theta_1 = \angle \sigma_1 P$, $\theta_2 = \angle \sigma_2 B$, $\theta_3 = \angle \sigma_3 T$ 。可见,震源机制一致性参数的最大值为 270° ,最小值为 0° 。

3 震源机制求解

依据上述方法,求得河套地震带 2001—2012 年 224 次 $M_L \geq 2.8$ 地震事件的震源机制解(表 1),其中包含 $2.8 \leq M_L < 3.5$ 地震 164 次, $3.5 \leq M_L < 4.0$ 地震 42 次, $M_L \geq 4.0$ 地震 18 次。根据滑动角和震源机制类型的对应关系(陈运泰等,2008),统计了震源机制类型的构成比例,其中走滑型事件 142 次(63.4%),正断层事件 50 次(22.3%),逆冲型事件 32 次(14.3%)。研究时段内,河套地震带主要产出走滑型地震,这也是其应力场的固有特征之一。1970 年以来,河套地震带的中强地震也统一表现为走滑型震源机制,只在呼包盆地东侧的和林格尔断裂出现 1 次正断层震例(图 1a);从应力场的方向特征看,河套地震带中强地震的震源机制解显示的压应力方位为 NE,张应力方位为 NW,整体表现出了与华北应力场和外围动力学作用环境相符的应力作用特征(谢富仁等,2004,2011;徐纪人等,2008)。2001 年以来,河套地震带中小地震事件的压应力优势分布方向为 NE,张应力优势分布方向为 NW,节面走向整体与断裂展布方向协调,即临河盆地地震事件的节面走向多为 NE 向,包头至西山嘴一带表现为近 EW 向,呼包盆地多为 NEE 向。另一方面,由于河套地震带的地质构造特点鲜明,盆地和隆起形态划分明朗,震源机制类型的空间分布似乎也表现出一定程度的构造相依特征(图 1b),在盆地内部多产出走滑型地震,在盆地边缘以及盆地和隆起过渡地带容易产出正断层和逆断层事

件, 临河盆地作为河套地震带的沉降中心, 其周缘出现的多次正断层和逆断层事件在一定程度上与盆地向隆起转换地带的垂直差异运动比盆地内部强烈有关(国家地震局“鄂尔多斯周缘活动断裂系”课题组, 1988)。图 2 给出了 CAP 方法求解 2010 年 6 月 20 日乌海 $M_L 4.7$ 地震的最佳双力偶震源机制解的示例。

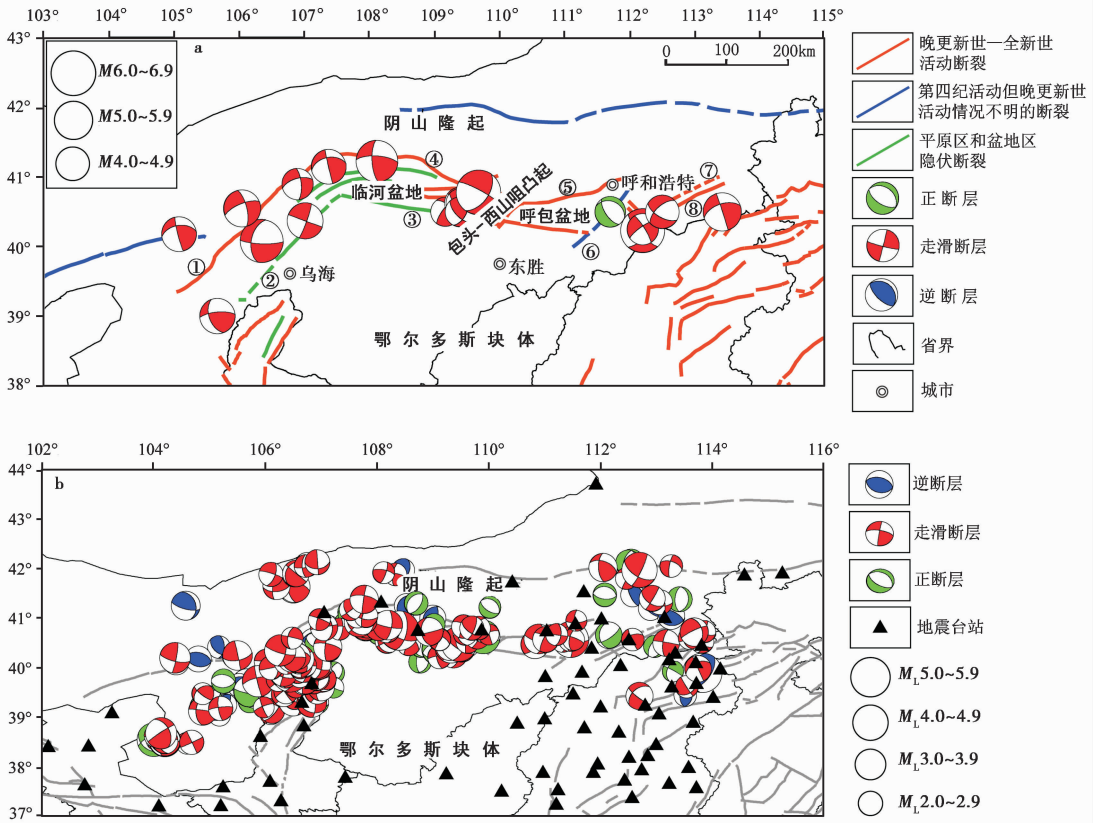


图 1 河套地震带的断裂构造、地震台站和震源机制解

Fig. 1 Fault structure, seismic station and focal mechanism solutions of earthquakes in Hetao seismic belt.

a 1970 年以来, $M_S \geq 4.0$; b 2001-01—2012-12, $M_L \geq 2.8$

a 中河套地震带的边界断裂和主要控震断裂: ①—⑧分别为狼山山前断裂、磴口-本井断裂、鄂尔多斯北缘断裂、色尔腾山山前断裂、大青山山前断裂、和林格尔断裂、蛮汉山山前断裂和岱海-黄旗海盆地南缘断裂

4 应力场反演

融合 1970—1999 年间河套地震带 $M_S \geq 4.0$ 地震的震源机制解(表 1), 以及 2001 年以来 $M_L \geq 2.8$ 地震的震源机制解开展应力场特征分析(图 1b)。分别运用平均力轴张量计算方法和自助线性反演方法对比分析。

4.1 平均力轴张量计算

基于上述震源机制解, 采用平均力轴张量计算方法(程万正等, 2006; 钟继茂等, 2006), 通过求解相应的本征方程计算出平均力轴张量及其主值。为细化应力场分布特征, 分别求解

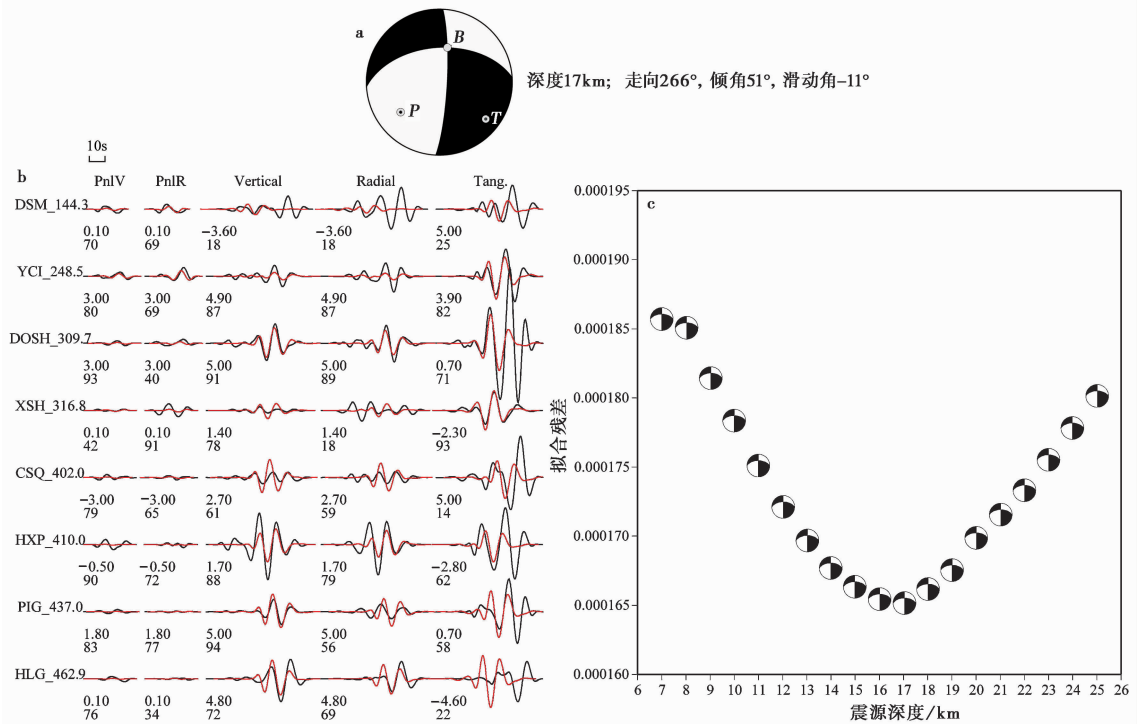


图 2 2010 年 6 月 20 日乌海 M_L 4.7 地震的 CAP 解

Fig. 2 CAP solution of M_L 4.7 Wuhai earthquake of June 20th, 2010.

a 深度 17km 处的震源机制解; b 理论地震图(红线)和观测地震图(黑线)之间的波形拟合效果, 波形最左侧为台站代码和震中距, 波形下方第 1 行为理论地震图相对于观测地震图的移动时间(s), 第 2 行为理论地震图和观测地震图的相关系数(%); c 不同震源深度下的拟合残差

了河套地震带及其所辖 2 个次级构造单元——临河盆地和呼包盆地的平均应力场方向(表 2)。结果显示, 2001 年以来河套地震带的压应力方位角为 47°, 作用方向为 NE; 张应力方位角 313°, 作用方向为 NW, 与区域及外围动力学环境基本相符。临河盆地的压应力方位角为 47°, 作用方向为 NE; 张应力方位角 325°, 作用方向为 NW; 呼包盆地的压应力方位角为 68°, 作用方向为 NEE, 张应力方位角 320°, 作用方向为 NW; 相对于河套地震带和临河盆地而言, 呼包盆地的压应力方位存在向 NEE 方向顺时针偏转的现象。可见, 河套地震带及其所辖 2 大次级盆地的应力场并非完全一致, 大应力场背景下存在区域性的小应力场特征。

4.2 自助线性反演

为与平均力轴张量计算结果进行对比和佐证研究结果的可靠性, 采用自助线性反演方法(Linear stress inversion bootstrap, LSIB)分别计算了河套地震带、临河盆地和呼包盆地的最佳应力张量(图 3, 表 3)。结果显示, 河套地震带的反演置信区域分布相对比较集中, 应力场的走滑(strike-slip)性质比较明朗; 临河盆地和呼包盆地的反演置信区域相对比较弥散, 但整体仍表现出走滑特征。从应力张量的分布方位看, 无论是河套地震带还是其所辖的 2 个次级盆地, 均主要受到 NE 向挤压应力和 NW 向拉张应力作用而表现出走滑型的应力场特征, 与平均力轴

表 1 河套地震带 1970 年以来 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制解Table 1 Focal mechanism solutions of $M_L \geq 4.0$ earthquakes occurring in Hetao seismic belt since 1970

序号	发震时间 (年-月-日)	地震位置		震级		节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴	
		北	东	M_S	M_L	走	倾	滑动	走	倾	滑动	方	倾	方	倾	方	倾
		纬 /(°)	经 /(°)			向 /(°)	角 /(°)	角 /(°)	向 /(°)	角 /(°)	角 /(°)	位 /(°)	角 /(°)	位 /(°)	角 /(°)	位 /(°)	角 /(°)
1	1975-06-24	40.50	111.70	4.4		146	64	-73	291	31	-121	120	74	219	30	310	11.5
2	1976-04-06	40.23	112.20	6.2		41	67	164	137	75	24	73	2	18	24	168	67
3	1976-09-12	40.50	109.42	4.0		56	76	-155	320	66	-16	279	28	187	7	86	60
4	1976-09-23	40.08	106.35	6.2		92	79	-41	192	49	-166	40	35	151	17	262	50
5	1977-02-02	40.25	112.20	4.5		328	80	-166	235	76	-10	192	17	101	3	1	72
6	1977-03-14	40.50	112.50	4.8		120	62	-34	227	61	-147	86	43	172	2	269	47
7	1978-01-22	40.90	106.90	4.5		355	71	-149	254	61	-22	217	35	123	6.5	24	54
8	1979-08-25	41.23	108.12	6.0		274	70	21	177	70	158	46	0	135.3	29	313	61.5
9	1980-10-13	40.50	109.17	4.2		217	73	141	320	54	21	272	13	174	39	19	47
10	1981-08-13	40.50	113.42	5.5		342	89	-146	251	56	-2	213.5	24	111	22	347	55
11	1982-12-08	40.63	109.40	4.5		126	80	41	27	49	167	251	20	355	36	139	47
12	1983-01-17	40.37	107.02	5.2		110	89	6	20	84	179	246	3.5	335	5	110	84
13	1983-02-09	40.63	109.40	4.1		131	65	40	22	54	149	255	6.5	351	45	160	44
14	1983-02-12	40.50	109.40	4.3		136	63	38	26	57	147	261	3.5	353	45	161	45
15	1991-01-13	40.55	106.05	5.3		346	70	-158	249	69	-21	207	29	118	1	27	61
16	1991-06-16	39.00	105.67	5.1		265	72	41	160	51	157	28	13	130	41	289	48
17	1991-09-14	40.18	105.08	5.0		166	84	139	260	49	7	220	23	115.5	32	340	50
18	1996-05-03	40.78	109.68	6.4		298	81	-37	34	54	-169	250	32.5	351	17.5	102	53
19	1997-10-21	41.15	107.38	5.0		167	88	136	260	46	3	225	26.5	112	30.5	324	46
20	2001-06-05	40.75	108.40	4.5		120	61	-144	229	59	-35	355	89	264	45	86	45
21	2001-07-22	40.62	109.90		4.3	99	68	-77	234	30	-131	40	62	174	21	271	19
22	2001-10-08	40.47	106.90		4.3	112	71	108	247	26	48	188	24	48	60	286	17
23	2003-06-10	40.57	111.47	4.1		0	81	167	92	77	9	46	3	316	16	146	74
24	2003-06-22	40.43	109.33		4.2	31	89	-29	122	61	-179	343	21	80	20	209	61
25	2004-03-06	40.35	106.27		4.0	9	62	164	107	76	29	235	9	331	30	130	58
26	2004-03-24	40.48	109.48	4.0		124	68	31	21	62	155	251	4	345	37	156	53
27	2004-07-16	40.37	109.30		4.2	27	64	-103	235	29	-65	272	68	127	18	33	12
28	2004-10-06	39.73	105.87		4.0	258	72	5	166	86	162	214	9	121	16	332	71
29	2005-02-27	40.88	107.80		4.1	336	54	10	240	82	143	293	18	192	31	49	53
30	2005-06-20	41.63	106.52		4.0	285	64	39	175	56	148	48	5	144	45	313	44
31	2007-12-05	40.10	106.50		4.1	116	36	-70	271	57	-104	143	74	12	10	280	12
32	2010-04-04	39.90	113.83	4.6		189	36	67	37	57	106	115	11	347	73	208	13
33	2010-06-20	39.88	106.45	4.2		266	51	-11	3	81	-140	232	33	128	20	13	50
34	2010-09-06	38.68	104.13		4.0	332	44	7	236	85	134	294	27	184	35	52	44
35	2010-12-09	38.55	104.00		4.3	115	32	-47	247	67	-113	122	61	354	19	257	21
36	2010-12-18	38.53	104.20		4.1	348	55	172	83	83	35	210	19	311	29	92	54

表 2 河套地震带的平均力轴张量计算结果

Table 2 Calculation results of average stress axis tensor for the Hetao seismic belt

研究区	σ_1		σ_2		σ_3	
	$A_z/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$	$A_z/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$	$A_z/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$
河套地震带	47	19	16	67	313	11
临河盆地	47	35	70	53	325	11
呼包盆地	68	51	40	36	320	14

注 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示平均构造应力主轴, A_z 表示力轴的方位角, φ 表示力轴的倾角。

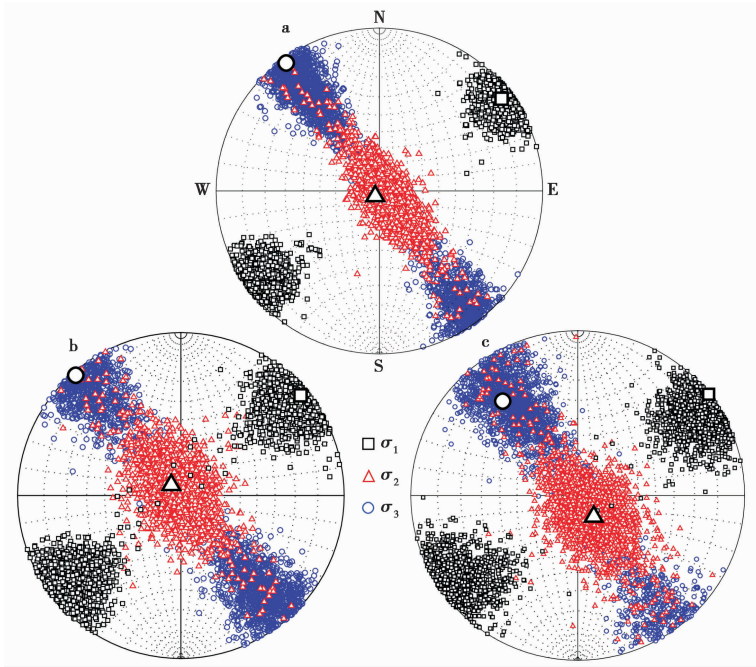


图 3 河套地震带的自助线性应力场反演结果

Fig. 3 LSIB result for the Hetao seismic belt.

a 河套地震带反演结果, b 临河盆地反演结果, c 呼包盆地反演结果; 黑色方块表示最大压应力 σ_1 , 红色三角表示中间应力 σ_2 , 蓝色圆圈表示最小压应力 σ_3

表 3 应力场的自助线性反演结果

Table 3 LSIB result of stress field

研究区	σ_1		σ_2		σ_3	
	$A_z/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$	$A_z/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$	$A_z/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$
河套地震带	52	2	137	86	322	4
临河盆地	50	1	318	80	320	10
呼包盆地	52	0	143	72	322	18

注 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别表示最大压应力、中间应力和最小压应力, A_z 表示方位, φ 表示倾角。

张量计算结果基本一致。值得注意的是,自助线性反演得到的中间应力轴(σ_2)的倾角接近 90° ,这种断层应力状态也是产生走滑型或斜滑型断层机制的条件之一(许忠淮,1997)。

4.3 应力场的一致性特征分析

基于平均应力张量反演结果(表2),根据河套地震带2001年以来 $M_L \geq 2.8$ 地震的震源机制解,通过计算每次地震的应力轴与平均应力轴的方向角差值,求取震源机制一致性参数,并进行了时序分析。时序曲线显示(图4),2001年以来,河套地震带震源机制一致性参数变化范围为21.73~82.1,平均值52.51,通过5点近均值平滑处理,2003年以来的一致性参数表现出下降趋势,表明区域应力场自2003年以来出现有序变化并有逐渐逼近平均应力场特征的趋势。

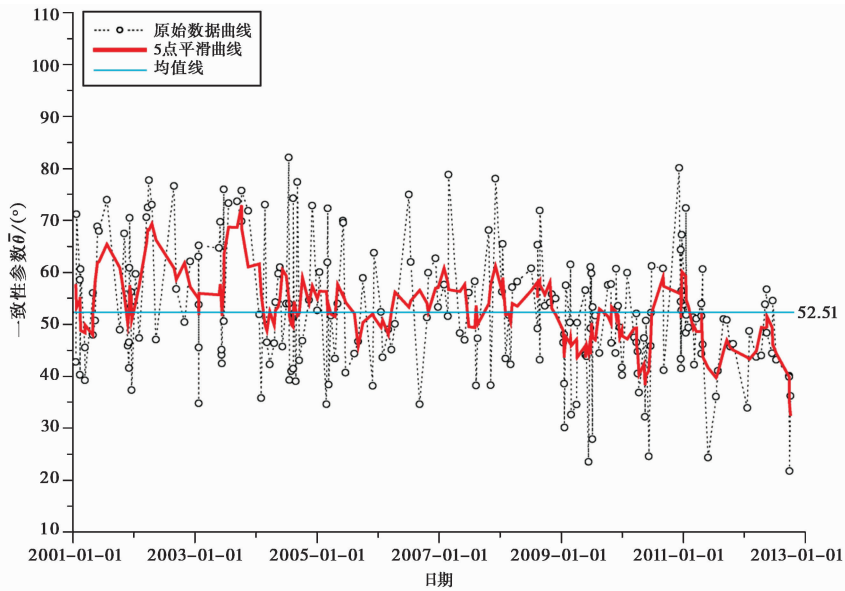


图4 一致性参数的时序变化

Fig. 4 Temporal variation of consistency parameter.

为考察应力场的一致性的空间分布特征,绘制了地震震源机制解 P 轴和 T 轴的水平投影分布(图5)。如图5a所示,河套地震带西部地区中强地震的压应力方位为NE,张应力方向NW,符合区域平均应力场特征;河套地震带东段的中强地震主要集中在呼包盆地两端,且应力场方向差异性明显,盆地西端的包头至西山咀地区的压应力方位集中于NEE—近EW向(图5a)。2001年以来, $M_L \geq 3.5$ 地震的 P 轴和 T 轴方位的水平投影分布规律性不明显,就整个河套地震带而言, P 轴或 T 轴方位没有表现出较为一致的空间分布,只在局部区域出现了相对一致的分布现象,例如临河盆地西南部地区的 P 轴方位基本呈NNE—NE向分布,乌海地区的 P 轴方位整体呈NNE向分布。

5 结论

本文分别运用平均力轴张量计算方法和自助线性反演方法对河套地震带的平均应力场进

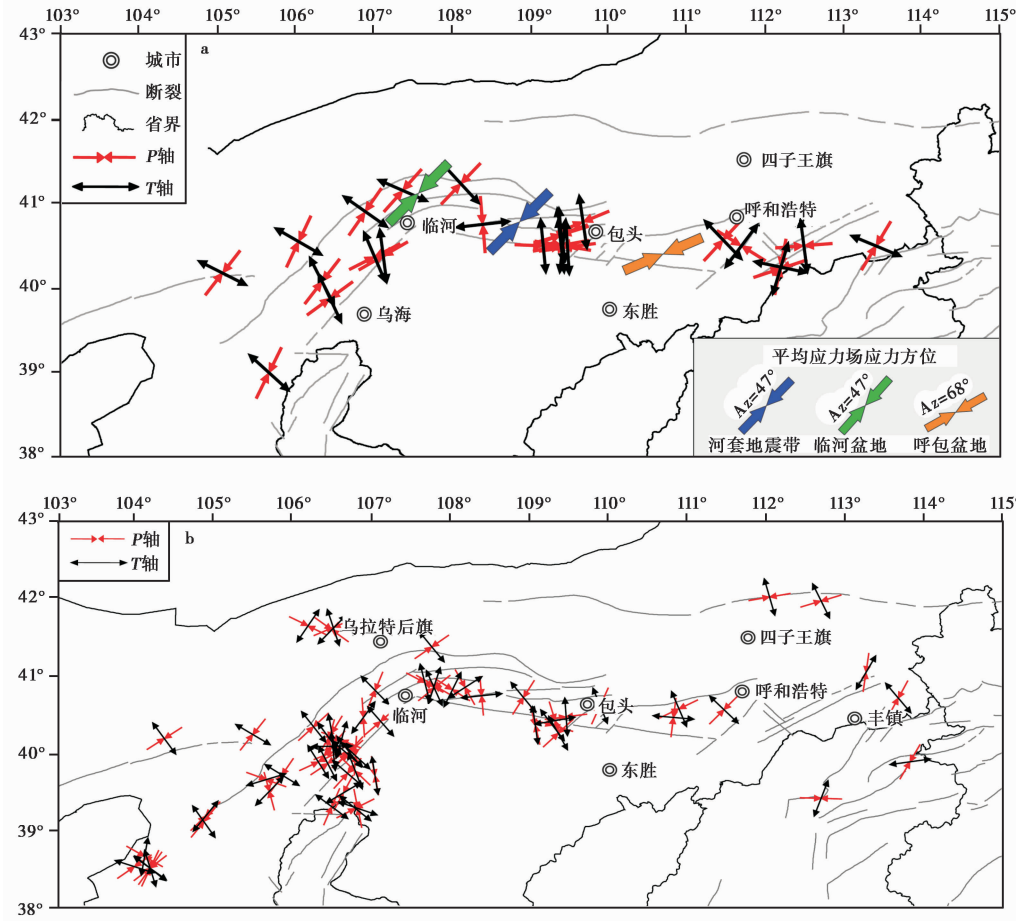


图 5 河套地震带的地震 P 、 T 轴方位水平投影

Fig. 5 Horizontal projection of P , T axis of Hetao seismic belt.

a 1970—2012 年, $M_S \geq 4.0$; b 2001—2012 年, $M_L \geq 3.5$

行了定量计算,反演结果较为统一,共同表达了来自 NE—EW 方向的挤压作用使得阴山隆起和鄂尔多斯块体间相互左旋剪切,运动的触点即河套地震带,这是其主要产出走滑型地震的主导力学机制,也是河套地震带固有的构造应力场特征(邓起东等,1985;国家地震局“鄂尔多斯周缘活动断裂系”课题组,1988)。

2001 年以来,河套地震带的应力场继承性变化,最大主压应力方位为 $47^\circ \sim 52^\circ$,作用方向为 NE—SW;最小主压应力方位为 $313^\circ \sim 322^\circ$,作用方向为 NW—SE;所辖临河盆地和呼包盆地的应力场特征存在区域性差异,临河盆地与河套地震带的应力场比较协调,压应力整体呈 NE 向,只在盆地中部出现小范围的局部变化,这可能与该区存在 1 条长约 50km, NNW 走向的右旋隐伏断裂有关;呼包盆地的应力场方向相对于临河盆地和河套地震带产生顺时针偏转,压应力方位 68° ,呈 NEE 向,范俊喜等(2003)根据小震震源机制资料反演得到包头—呼和浩特—大同地区的压应力方位为 $64^\circ \sim 74^\circ$,这在中国大陆现代应力场图中也有类似情况(谢富仁等,2004,2011),并可能与盆地边界断裂的走向有关(盛书中等,2015)。

震源机制一致性参数自 2003 年开始出现趋势下降, 可能预示了短期内的震源应力场方向与构造应力场方向逐渐趋于“统一”, 也可能是区域断层逐步进入“协同化”阶段的标志之一(马瑾等, 2012)。

本文仅根据震源机制资料分析了河套地震带的平均应力场特征, 但限于观测台站布局和震源机制解精度等因素的影响, 所得结果未必能够准确地呈现河套地震带的应力场变化实况。如果能保证参与震源机制求解的台站对每次地震均产生完整包络, 且地震在时间、空间、震级和深度的共同约束下分布均匀而密集, 则可根据震源机制资料开展每条活动断裂的具体运动形态分析和断层运动模型构建, 进而刻画出更加精细和真实的应力场状态。

致谢 振幅比求解震源机制采用了刁桂苓研究员研制的 APAS 程序, CAP 反演程序来源于美国圣路易斯大学朱露培教授, 图件由 GMT 和 Zmap 程序包绘制完成, 审稿专家的修改建议对本文帮助很大, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 曹刚. 2001. 内蒙古地震研究 [M]. 北京: 地震出版社.
- CAO Gang. 2001. Earthquake Research in Inner Mongolia [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 陈颢. 1978. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数 [J]. 地球物理学报, 21(2): 146—159.
- CHEN Yong. 1978. Consistency of focal mechanism as a new parameter in describing seismic activity [J]. Acta Geophysica Sinica, 21(2): 146—159 (in Chinese).
- 陈运泰, 顾浩鼎. 2008. 震源理论基础(上册) [M]. 北京: 地震出版社.
- CHEN Yun-tai, GU Hao-ding. 2008. Fundamentals of Seismic Source Theory, Part 1 [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 程万正, 阮祥, 张永久. 2006. 川滇次级地块震源机制解类型及一致性参数 [J]. 地震学报, 28(6): 561—573.
- CHENG Wan-zheng, RUAN Xiang, ZHANG Yong-jiu. 2006. Types of focal mechanism solutions and parameter consistency of the sub-blocks in Sichuan and Yunnan Provinces [J]. Acta Geophysica Sinica, 28(6): 561—573 (in Chinese).
- 邓起东, 冉勇康, 杨晓平, 等. 2007. 中国活动构造图(1:400 万) [Z]. 北京: 地震出版社.
- DENG Qi-dong, RAN Yong-kang, YANG Xiao-ping, *et al.* 2007. Map of China Active Faults (1:4 000 000) [Z]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 邓起东, 尤惠川. 1985. 鄂尔多斯周缘断陷盆地的构造活动特征及其形成机制 [A]. 见: 国家地震局地质研究所编. 现代地壳运动研究(1). 北京: 地震出版社.
- DENG Qi-dong, YOU Hui-chuan. 1985. Mechanism and structure activity of Ordos Basin [A]. In: Institute of Geology, CEA (ed). Study on the Modern Crustal Movement (1). Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 刁桂苓, 王海涛, 高国英, 等. 2005. 伽师强震系列应力场的转向过程 [J]. 地球物理学报, 48(5): 1062—1068.
- DIAO Gui-ling, WANG Hai-tao, GAO Guo-ying, *et al.* 2005. A deflection process for stress field of the Jiashi strong earthquake sequence [J]. Chinese J Geophys, 48(5): 1062—1068 (in Chinese).
- 刁桂苓, 于利明, 宁杰远, 等. 1992. 1989 年大同震群的破裂特征 [J]. 地球物理学报, 36(3): 360—368.
- DIAO Gui-ling, YU Li-ming, NING Jie-yuan, *et al.* 1992. Fracture characteristic of the 1989 Datong earthquake swarm [J]. Chinese J Geophys, 36(3): 360—368 (in Chinese).

- 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.
- FAN Jun-xi, MA Jin, DIAO Gui-ling. 2003. Contemporary tectonic stress field around the Ordos fault block inferred from earthquake focal mechanism [J]. Seismology And Geology, 25(1): 88—99(in Chinese).
- 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 [M]. 北京: 地震出版社. 39—76.
- The Research Group on “Active Fault System around Ordos Massif”. 1988. Active Fault System around Ordos Massif [M]. Seismological Press, Beijing. 39—76(in Chinese).
- 梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镒, 等. 1984. 利用区域地震台网 P、S 波振幅比资料测定小震震源参数 [J]. 地球物理学报, 27(3): 249—257.
- LIANG Shang-hong, LI You-ming, SHU Pei-yi, *et al.* 1984. On the determining of source parameters of small earthquakes by using amplitude ratios of P and S from regional network observations [J]. Chinese J Geophys, 27(3): 249—257(in Chinese).
- 马瑾, Sherman S I, 郭彦双. 2012. 地震前亚失稳应力状态的识别: 以 5° 拐折断层变形温度场演化的实验为例 [J]. 中国科学(D 辑), 42(5): 633—645. doi: 10.1007/s11430-012-4423-2.
- MA Jin, Sherman S I, GUO Yan-shuang. 2012. Identification of meta-instable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault [J]. Science in China(Ser D), 42(5): 633—645(in Chinese).
- 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构 [J]. 地球物理学报, 58(2): 436—452. doi: 10.6038/cjg20150208.
- SHENG Shu-zhong, WAN Yong-ge, HUANG Ji-chao, *et al.* 2015. Present tectonic stress field in the cricum-Ordos region deduced from composite focal mechanism method [J]. Chinese J Geophys, 58(2): 436—452(in Chinese).
- 万永革. 2011. 中国现代构造应力场 [J]. 世界地震译丛, (3): 18—29.
- WAN Yong-ge. 2011. Contemporary tectonic stress field in China [J]. Translated World Seismology, (3): 18—29(in Chinese).
- 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等. 2004. 中国大陆及邻区现代应力场分区特征 [J]. 地球物理学报, 47(4): 654—662.
- XIE Fu-ren, CUI Xiao-feng, ZHAO Jian-tao, *et al.* 2004. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent area [J]. Chinese J Geophys, 47(4): 654—662(in Chinese).
- 谢富仁, 张红艳, 崔效锋, 等. 2011. 中国大陆现代构造应力场与强震活动 [J]. 国际地震动态, (1): 4—12.
- XIE Fu-ren, ZHANG Hong-yan, CUI Xiao-feng, *et al.* 2011. The modern tectonic stress field and strong earthquakes in China [J]. Recent Developments in World Seismology, (1): 4—12(in Chinese).
- 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.
- XU Ji-ren, ZHAO Zhi-xin, ISHIKAWA Y. 2008. Regional characteristics of crustal stress field and tectonic motions in and around Chinese mainland [J]. Chinese J Geophys, 51(3): 770—781(in Chinese).
- 许忠淮. 1997. 岩石层应力场(讲座)[J]. 地震地磁观测与研究, 18(1): 18—37.
- XU Zhong-huai. 1997. Lithosphere stress field(lecture) [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 18(1): 18—37(in Chinese).
- 钟继茂, 程万正. 2006. 由多个地震震源机制解求川滇地区平均应力场方向 [J]. 地震学报, 28(4): 337—346.
- ZHONG Ji-mao, CHENG Wan-zheng. 2006. Determination of directions of the mean stress field in Sichuan-Yunnan

region from a number of focal mechanism solutions [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 28(4): 337—346.

Gephart J W, Forsyth D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence [J]. *J Geophys Res*, 89: 9305—9320.

Giardini D, Dziewonski A M, Woodhouse J H. 1985. Centroid-moment tensor solutions for 113 large earthquakes in 1977—1980 [J]. *Phys Earth Planet Inter*, 40(4): 259—272.

Michael A J. 1984. Determination of stress from slip data: Faults and folds [J]. *J Geophys Res*, 89: 11517—11526.

Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. *Bull Seism Soc Amer*, 86(5): 1634—1641.

Zhu L P, Rivera L A. 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media [J]. *Geophys J Int*, 148(3): 619—627.

ANALYZING THE VARIATION CHARACTERISTICS OF STRESS FIELD IN HETAO SEISMIC BELT USING FOCAL MECHANISM DATA

HAN Xiao-ming¹⁾ LIU Fang¹⁾ ZHANG Wen-tao²⁾ LI Juan¹⁾ HOU Di¹⁾

1) *Inner Mongolia Earthquake Administration, Hohhot 010010, China*

2) *Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230000, China*

Abstract

Based on analysis of background of geological tectonic movement and strong earthquake activity, we first obtained the focal mechanism solutions using amplitude ratio and CAP method, then determined the characteristic of average stress field of the study area by inversion of the stress field. On this basis, we selected the source mechanism consistency parameter as the inspection index to obtain the latest changes of stress field in Hetao seismic zone based on its temporal and spatial analysis. Two methods were used in the stress field inversion for comparison and analysis, which are average stress axis tensor and LSIB (Linear stress inversion bootstrap, LSIB). According to the geological tectonic movement and focal mechanism solutions of $M_s \geq 4.0$ earthquakes from 1970, we judge that the stress field evolution process of Hetao seismic belt is controlled jointly by vertical difference movement and horizontal shear movement, resulting in that the normal fault and strike-slip fault mechanisms are dominating.

Taking into account the station layout of the study area, and in order to ensure the accuracy of calculation, we calculated 224 earthquakes focal mechanism solutions by using amplitude ratio and CAP method, including 164 earthquakes with $2.8 \leq M_L < 3.5$, 42 earthquakes with $3.5 \leq M_L < 4.0$, and 18 earthquakes with $M_L \geq 4.0$; The statistical results on type of focal mechanisms show that, there are 142 strike-slip earthquakes (63.4%), 50 normal fault earthquakes (22.3%) and 32 thrust fault earthquakes (14.3%). In this study period (from 2001 to 2012), most earthquakes had a strike-slip mechanism in Hetao seismic belt, this is one of the inherent characteristics of the stress field.

The result of average stress axis tensor and LSIB shows that, the azimuth of maximum compressional stress is $47^{\circ} \sim 52^{\circ}$, direction is NE-SW; The azimuth of minimum compressional stress is $313^{\circ} \sim 322^{\circ}$, direction is NW-SE; This indicates that, the stress field characteristics of Hetao seismic belt and its sub-block are not completely consistent. Linhe Basin exhibits coordinated stress field characteristics with Hetao seismic belt, but Hubao Basin exhibits regional differences, direction of compressive stress has clockwise deflection in Baotou area, and the compressive stress direction is NEE. This heterotypical character of stress field is also confirmed by horizontal projection distribution of stress axis of historical strong earthquakes and recent moderate and small earthquakes. Since 2003, the temporal sequence curve of consistency parameter of Hetao seismic belt had a downward trend, this change was caused by focal mechanism consistency parameter of Linhe to Wuhai area, which indicates that this structural position is possible to be a priority area for stress accumulation and accelerated release in future.

Key words Hetao seismic belt, focal mechanism solutions, stress field inversion, consistency parameter

〔作者简介〕 韩晓明,男,1980年生,2007年于中国地震局兰州地震研究所获固体地球物理学专业硕士学位,副研究员,现主要从事数字地震学方法应用和地震预测研究,电话 0471-6511441, E-mail: hxmpower@126.com。