

巴颜喀拉块体东部区域震源机制解的构造意义^{*}

屠泓为¹, 樊 荣², 杨晓霞¹, 罗国富³

(1. 青海省地震局, 青海 西宁 810001; 2. 中国地震台网中心, 北京 10036;
3. 宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001)

摘要: 结合青藏高原的块体构造和中级地震震源机制解, 对巴颜喀拉地块东部区域的震源机制解进行分区域计算, 得到不同区域的应力场状态, 证实了巴颜喀拉地块“东逸”的理论力学背景。根据块体构造相互作用等方面的分析, 对不同区域的地震性质及应力状态的形成原因进行解释和推断, 并对汶川 8.0 级地震的构造影响进行阐述, 表明在一些块体的边界区域, 虽然位移速率较低, 但仍有可能发生较大地震。

关键词: 汶川地震; 巴颜喀拉地块; 应力场; 震源机制解

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)增刊-0028-06

0 引言

2008 年 5 月 12 日, 龙门山断裂带发生了汶川 8.0 级地震, 造成了巨大的人员死亡及财产损失, 地震诱发了大区域大面积的山崩、滑坡、塌方、泥石流等严重的地质灾害, 由此引起交通、通讯等方面的次生灾害。

地震发生后, 各类别专业人员迅速开展资料收集工作并进行研究, 地震记录表明, 余震主要分布在映秀镇至青川县的龙门山断裂带中北段, 形成长达 330 km 的余震带 (张培震等, 2008)。主震震源机制解表明, 本次地震是以逆冲为主兼少量的右旋分量的地震, 这种结果比较吻合巴颜喀拉地块向东“逸出”的构造机制, 得到了广泛的关注 (曾融生等, 1993; 熊熊等, 2001; 张培震等, 2002a, b; 徐锡伟等, 2003; 朱守彪, 张培震, 2009)。张培震等 (2008) 认为龙门山沿这条破裂断裂带既有垂直抬升和逆冲运动, 又有东北方向的运动, 最大的垂直错距和右旋水平错距分别达到 5.0 m 和 4.8 m, 沿整个破裂带的平均错距可达 2~3 m。因为该区域历史地震记载中只有 3 次 6~6½ 级强震, 而且其第四纪构造活动速率很低, 造成了速率活动较小的区域地震危险性较小的误判, 这次地震的突发性和超预期的强度改变

了地学界的一些观点和研究思路 (张培震等, 2008)。刘峡等 (2014) 的研究结果显示强震前龙门山断裂带保持低变形, 右旋错动不超过 $1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 挤压不超过 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 明显低于其他断裂带, 但其两侧应力值与其他断裂带相当, 主压应力轴与断裂带走向垂直, 形成很宽的挤压带。

本文结合青藏高原的块体构造和中小地震震源机制解, 计算巴颜喀拉地块东部区域构造应力场方向, 并运用相关结果与主震所代表的应力场作对比研究。

1 研究概述

构造应力场的研究是认识地壳构造运动的重要方法之一, 它不仅涉及到地震发生的力源和所在地区构造运动孕育和转变的规律, 而且可以推断地下未知构造的方位、性质和形态等, 对解释板块运动、山脉的隆升、断裂构造的运动模式等方面的研究都具有重要意义 (张国民, 张培震, 2000)。

Aki (1966) 提出运用格点尝试法对同一区域多样本震源机制解的平均 P、B、T 轴的方向进行求取和换算可代表区域应力场。许忠淮等 (1987) 认为区域构造应力场在一定的时空内具有一定的

^{*} 收稿日期: 2014-08-30.

基金项目: 青海省地震基金 (2012A01)、青海省工程地震研究院 (2012) 及地震科技星火计划项目 (XH13024Y) 联合资助。

稳定性,虽然每个地震都会在震源区附近引起应力场的一定变化,但只要有一定的样本量,多个地震的平均P、B、T轴方向可代表一个区域或者构造带的平均构造应力场分布情况。这一方法在地震学各领域得到广泛的应用(许忠淮等,1987;万永革等,2011a, b;盛书中等,2013;屠泓为等,2014)。

分析表明,破裂面的优势取向与引起破裂的应力状态有关,故应力场方向在破裂面的研究方面具有重要作用。在岩石层内,岩石处于高位压状态,如果以 P_1 、 P_2 、 P_3 轴分别表示震源区在破裂前一刻的主(张)应力轴,那么破裂面即断层面与最大主压应力轴 P_3 轴的夹角随内摩擦系数 μ 的增大而减小,P轴和T轴方向反映了地震前后震源区应力状态的变化,而不是震源区构造应力本身。如图1所示,P、T轴与 P_1 、 P_3 的方向都分别成 $45^\circ - \theta$ 的角度(陈运泰,顾浩鼎,2004)。因此,运用P、T轴研究构造应力场时应该考虑这一方面,当 $\mu=0$ 时,破裂面的法向与 P_1 轴夹角 θ 为 45° ,当 $\mu=1$ 时,破裂面的法向与 P_1 轴夹角 θ 为

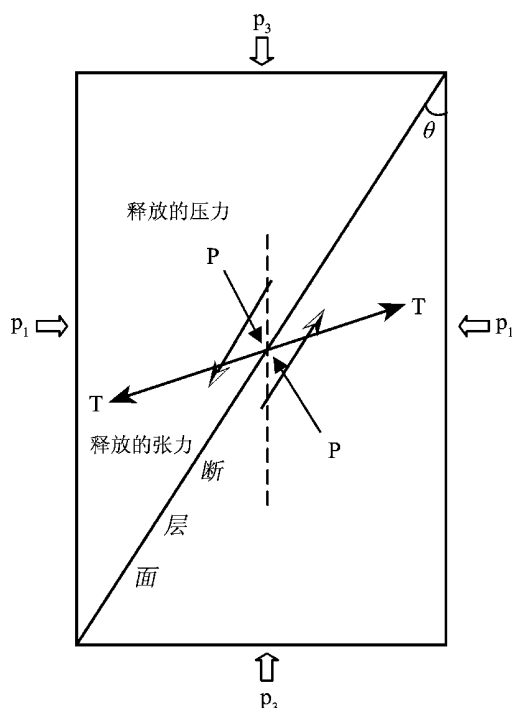


图1 岩石破裂三轴应力试验示意图
(据陈运泰,顾浩鼎,2004)

Fig.1 The schematic diagram of fracture rock triaxial stress test (according to Chen, Gu, 2004)

22.5°。故在实际分析中,P、T轴与 P_1 、 P_3 的方向夹角变化范围为 $22.5^\circ \sim 45^\circ$ 。

2 计算与分析

为结合巴颜喀拉块体东部区域分析汶川周边区域的地震分布及构造等,根据哈佛大学GCMT目录(表1)^①,本文在($95^\circ \sim 105^\circ \text{E}$, $29^\circ \sim 37^\circ \text{N}$)范围内选取了分布在巴颜喀拉块体周边区域的131次地震的震源机制解(图2), $M_s \geq 6.3$ 地震约15次,其中块体东部边界龙门山断裂附近的地震频次高、强度大,如发生过1976年8月的两次7级地震和1次6.7级地震、2008年5月12日汶川8.0级地震、2013年4月20日芦山7.0级地震等,这些地震震源机制均显示以右旋逆断层为主的破裂性质,历史上还发生了1933年7月25日茂汶叠溪7½级地震,表明龙门山断裂带的活动构造十分强烈。但早期地震均发生在龙门山断裂带的偏北部区域,而龙门山断裂带的中西南部区域却鲜有地震发生;巴颜喀拉地块北部也有一系列地震发生,但成带性不明显,而是成丛的发生,最大为1990年4月26日 $M_s 7.0$ 地震;其块体南部沿甘孜—玉树—风火山断裂至鲜水河断裂发生了一系列地震,其破裂性质均以左旋走滑为主;而巴塘、理塘等断裂带上的地震则表现为正断层性质。南

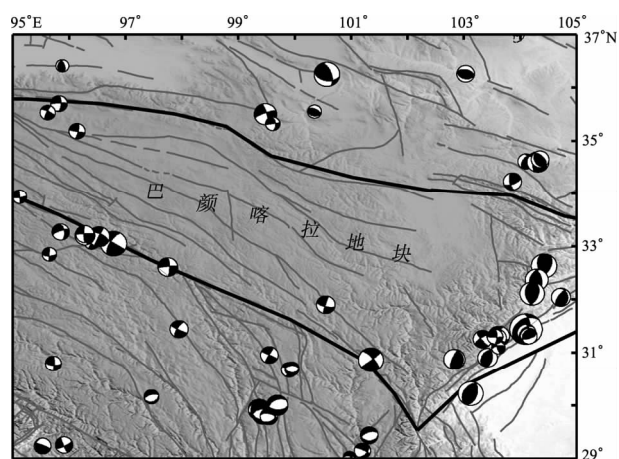


图2 巴颜喀拉地块东部区域地震震源机制解分布
Fig.2 The distribution of focal mechanism solution of earthquakes in east area of Balyankalla Block

① <http://www.globalcmt.org/>.

表 1 研究区域的 GCMT 解 (UTC)
Tab. 1 The GCMT solution in research region (UTC)

日期 年-月-日	震级	节面 1/(°)			节面 2/(°)			日期 年-月-日	震级	节面 1/(°)			节面 2/(°)		
		走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角			走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
1976-08-12	5.9	148	45	93	323	45	87	1986-02-04	5.5	358	33	-86	173	57	-93
1976-08-16	6.7	29	48	122	166	51	60	1986-02-06	5.4	132	57	-141	18	58	-40
1976-08-21	6.3	198	40	113	349	54	72	1986-06-01	5.2	278	79	-11	10	79	-169
1976-08-23	6.4	172	45	72	16	48	107	1986-09-24	5.5	321	41	-98	151	50	-83
1976-11-06	6.3	19	66	-6	111	84	-156	1986-12-21	5.4	28	71	-167	294	78	-19
1979-03-29	5.8	358	75	-174	266	84	-15	1987-02-09	5.5	1	70	-172	268	83	-20
1979-11-25	5.2	357	79	-175	266	85	-11	1987-08-09	5.2	73	27	-90	253	63	-90
1979-12-21	5.3	119	42	72	323	51	106	1987-10-23	5.1	153	20	-110	353	72	-83
1980-02-02	5.5	213	74	-6	304	84	-164	1987-12-30	5.7	122	84	5	32	85	174
1981-06-01	5.4	334	34	93	151	56	88	1988-10-02	5.3	332	16	-89	151	74	-90
1981-01-23	6.5	319	73	-4	51	86	-163	1988-11-19	5.6	31	79	-9	123	81	-169
1981-08-14	5.2	153	46	-141	33	63	-52	2000-01-14	5.5	25	77	-2	116	88	-167
1981-08-16	5.1	298	66	-7	30	83	-156	2000-01-14	5.9	27	78	-6	118	84	-168
1982-06-15	5.6	105	72	-3	196	87	-162	2000-01-26	5.1	95	70	11	1	80	160
1982-07-03	5.3	347	26	-90	166	64	-90	2000-04-15	5.2	90	68	-4	181	86	-158
1982-10-08	5.2	146	22	-112	350	69	-81	2000-06-06	5.5	96	68	-6	188	85	-158
1985-11-28	5.7	311	49	17	210	77	138	2000-06-07	6.3	290	38	41	166	66	120
1985-04-18	5.7	100	57	-170	5	82	-33	2000-06-08	5.1	126	33	67	333	60	104
1985-04-24	5.2	324	38	58	182	58	113	2000-09-12	6.1	343	80	-170	251	80	-10
1985-08-01	5.7	176	15	153	292	83	76	2000-09-13	5	84	77	1	353	89	167
1985-08-11	5.3	200	33	123	342	63	70	2000-09-20	5	354	59	-177	262	87	-31
1986-09-05	5.5	14	65	177	105	87	25	2001-02-23	5.6	92	34	-73	252	57	-101
1986-03-13	5.3	330	25	-104	165	66	-84	2001-05-23	5.4	8	87	-2	98	88	-177
1986-08-06	5.3	40	41	-162	296	78	-50	2001-07-25	5.5	350	53	-164	251	77	-38
1986-08-26	5.9	125	37	55	346	60	113	2002-10-27	5.5	35	69	1	305	89	159
1987-11-01	5.2	28	45	132	157	58	56	2002-08-08	5.3	92	41	-86	267	49	-93
1989-01-07	5.4	170	65	28	68	65	152	2002-10-26	5.3	11	78	176	101	86	12
1989-02-12	5.3	295	60	24	193	69	148	2002-12-14	5.5	98	34	97	269	56	85
1989-04-15	6.4	273	29	-73	74	62	-99	2003-04-17	6.3	294	29	88	116	61	91
1989-04-25	6.1	245	40	-114	96	54	-71	2003-07-21	5.9	200	80	-6	291	84	-170
1989-05-03	6.2	240	44	-117	95	52	-66	2003-08-18	5.5	65	77	-6	156	84	-167
1989-05-03	5.8	271	45	-90	91	45	-90	2003-09-16	4.9	61	23	-119	272	70	-79
1989-07-21	5.6	59	38	-127	283	60	-64	2003-10-16	5.6	18	88	-1	108	89	-178
1989-09-22	6.1	352	18	61	202	74	99	2003-10-25	5.8	108	40	55	331	58	116
1990-03-08	5.2	32	73	173	124	84	18	2003-10-25	5.8	85	54	21	343	73	142
1990-04-26	6.4	101	46	41	340	62	128	2003-11-13	5.1	347	42	53	212	58	118
1990-02-12	5.3	295	60	24	193	69	148	2004-02-24	5	141	87	-179	51	89	-3
1989-04-15	6.4	273	29	-73	74	62	-99	2004-03-02	4.9	100	41	93	276	49	87
1989-04-25	6.1	245	40	-114	96	54	-71	2004-03-16	5.1	127	42	116	274	53	69
1989-05-03	6.2	240	44	-117	95	52	-66	2004-05-04	5.3	145	83	175	236	85	7
1989-05-03	5.8	271	45	-90	91	45	-90	2004-05-04	5.2	140	87	-178	50	88	-3
1989-07-21	5.6	59	38	-127	283	60	-64	2004-05-10	5.5	272	33	69	116	59	103
1989-09-22	6.1	352	18	61	202	74	99	2004-05-24	4.9	339	45	107	136	48	74
1990-03-08	5.2	32	73	173	124	84	18	2004-08-10	5.3	156	85	1	66	89	175
1990-04-26	6.4	101	46	41	340	62	128	2005-08-05	5.2	252	73	-178	161	88	-17
1985-07-09	5.1	100	33	77	296	58	98	2006-03-29	5.3	297	73	11	204	79	163
1985-07-21	5.6	104	41	91	283	49	90	2006-07-17	5.2	297	70	-1	27	89	-160
1986-02-03	6.6	0	36	-68	153	57	-105	2006-07-22	4.9	347	59	27	242	67	146

续表 1

日期 年-月-日	震级	节面 1/(°)			节面 2/(°)		
		走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
2006-08-25	5	355	50	45	232	57	130
2007-05-07	5.5	210	73	-173	118	84	-17
2007-06-29	5.2	105	82	-4	196	86	-172
2007-07-22	5	159	85	176	249	86	5
2008-03-30	5.1	64	75	1	334	89	165
2008-05-12	7.9	231	35	138	357	68	63
2008-05-12	6.1	204	71	-169	110	80	-19
2008-05-12	5.6	227	41	132	357	61	60
2008-05-13	5.8	213	42	109	7	51	73
2008-05-14	5.4	215	80	-177	124	87	-10
2008-05-16	5.6	235	71	-170	142	81	-19
2008-05-16	4.9	258	64	13	162	78	153
2008-05-16	5	360	69	174	92	84	21
2008-08-01	5.7	354	29	54	213	67	108
2008-08-30	6	100	86	180	190	90	4
2008-08-31	5.6	11	77	-7	102	84	-167
2008-11-10	6.3	252	28	57	108	67	106
2008-11-11	5.1	357	41	158	104	76	51

日期 年-月-日	震级	节面 1/(°)			节面 2/(°)		
		走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
2009-06-29	5.3	212	29	54	71	67	108
2009-07-09	5.7	204	84	-3	294	87	-174
2009-08-28	6.3	295	31	102	101	60	83
2009-08-31	5.8	277	33	90	98	57	90
2010-04-13	6.9	210	67	178	300	88	23
2010-04-14	6.1	296	65	2	205	89	155
2010-05-29	5.8	75	88	1	345	89	178
2010-06-03	5.5	178	80	177	268	87	10
2012-06-24	5.6	313	46	-126	179	55	-59
2012-09-07	5.6	350	51	35	236	63	136
2013-09-07	5.3	234	58	155	338	69	34
2013-01-18	5.6	208	86	179	298	89	4
2013-03-03	5.4	337	42	-113	187	52	-71
2013-04-20	6.6	212	42	100	19	49	81
2013-06-05	5.1	266	35	80	98	56	97
2013-07-21	6	196	57	151	303	66	37
2013-07-22	5.4	153	37	103	316	54	80

部区域地震性质的不同，表明了青藏高原主要力源是受印度洋板块向北推挤而产生的，而在青藏高原的东部区域受到力的方向主要是东北向至东北东向，由此形成的块体受力不均匀而产生的位移速率不同，于是在有些区域形成拉张状态，例如出现的正断层地震就是实例。

通过分析地震性质分类，得出研究区域内的走滑型、逆断层型、正断层型分别占 51%、31% 及 18%，表明研究区域的应力状态是以挤压错动为主，

这样才会产生众多的走滑断层和逆断层的地震，而正断层性质地震一般仅在一些特殊部位出现。

为研究小区域的应力状态，根据地震分布将研究区域以巴颜喀拉地块东部为中心划分为 3 个目标区（图 2），分别为巴颜喀拉地块西南、北部及东南区域。获得的综合应力场结果如图 3 所示，西南部区域的主压应力轴方向为北东向（237° ~ 239°），仰角变化范围为 16° ~ 18°，主张应力轴方向为北西向（147° ~ 149°），仰角为 0° ~ 2°（图 3a）；

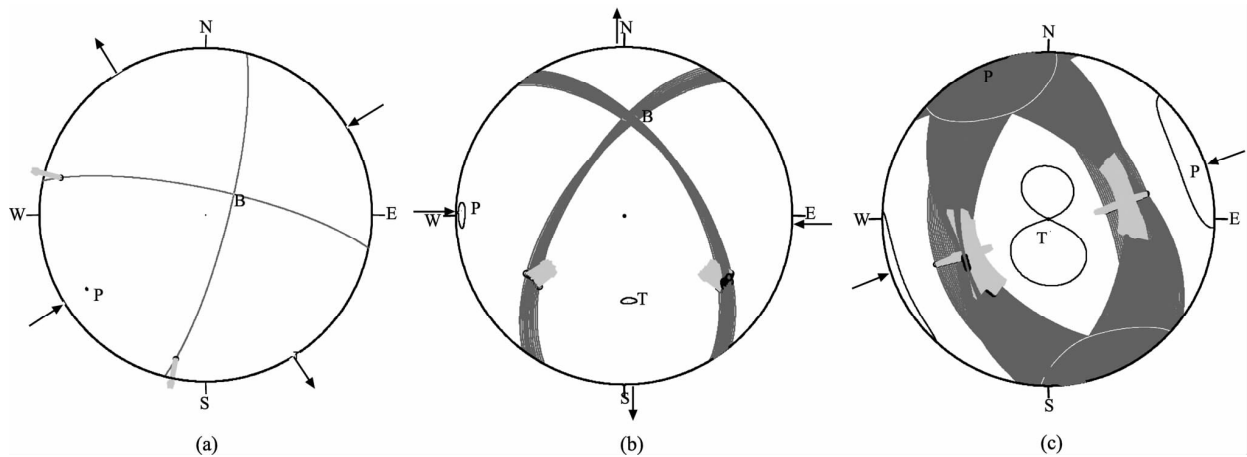


图 3 巴颜喀拉地块东部分区域综合应力场

(a) 西南部区域；(b) 北部区域；(c) 东南部区域

Fig. 3 The sub regional comprehensive stress field in east area of Balyankalla Block
(a) the southwest region; (b) the north region; (c) the southeast region

北部区域的主压应力轴方向为近东西向 ($265^{\circ} \sim 275^{\circ}$), 仰角为 $1^{\circ} \sim 6^{\circ}$, 主张应力轴为近南北向 ($171^{\circ} \sim 182^{\circ}$), 仰角为 $46^{\circ} \sim 50^{\circ}$ (图 3b); 东南部区域 (龙门山断裂带) 的主压应力轴为东北东向 ($42^{\circ} \sim 93^{\circ}$), 仰角为 $0^{\circ} \sim 17^{\circ}$, 主张应力轴变化范围比较大, 为 $115^{\circ} \sim 251^{\circ}$ (图 3c)。

根据上述求取的主压 (张) 应力轴的方向, 取 $\mu = 1$, 经换算可分别估算出西南、北部和东南 3 个区域的构造应力场方向分别为北东北向、近东北向和近东西向。从构造分布上来验证应力场方向的合理性表明, 这些区域的构造破裂走向比较符合前述的岩石破裂三轴应力试验示意图, 表明本文对应力场的估算是合理的。

由图 2 可以看出, 1976 年以来巴颜喀拉地块内部几乎没有中强以上地震发生, 地震主要分布在块体外部, 揭示了巴颜喀拉地块内部相对稳定。这种应力场的格局表明巴颜喀拉地块在印度洋板块的不均匀推挤作用下, 并由受到于青藏块体的强烈阻挡和相互作用, 形成巴颜喀拉地块向东“逸出”是合理的, 震源机制解的分布特征也证明了相应的构造背景。

一般来说, 强震尤其大地震的震源机制解可以代表一个断层或者一个区域的应力状况, 通过对 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 地震震源机制解的分析, 表明断层走向为 231° , 倾角 35° , 滑动角 138° , P 轴方位角为 107.5° , 仰角为 18° , T 轴方位角为 229° , 仰角为 58° 。如果仍取 $\mu = 1$, 那么汶川 $M_s 8.0$ 地震代表的构造应力场约为 130° , 也就是近东南东向, 和运用多个震源机制解解算的综合应力场结果基本一致。

3 结论与讨论

(1) 在巴颜喀拉块体的南部边界及北部边界的地震以走滑性质为主, 而其东部边界以逆冲为主, 西南区域靠近块体边界区域的地震以走滑性质为主, 而南部远离边界区域的许多地震出现了以正断层性质为主的分布状态, 这种分布表明了块体不同区域的力学状态有很大的差异。

(2) 分区域主应力轴综合计算认为, 在块体的不同区域, 尤其是不同边界带附近地震的主压应力轴均表现了各自的特征。

(3) 巴颜喀拉地块西南北部和东南区域的构造应力场分别为北东北向近东北向、近东西向, 而汶川 8.0 级地震的主压应力方向为东南东向。

(4) 汶川 8.0 级地震的震源机制解所代表的应力场方向与巴颜喀拉地块东南区域的综合应力场一致。该地震的大尺度地表破裂和破裂形态进一步证实巴颜喀拉地块存在向东“逸出”的结论。

参考文献:

- 陈运泰, 顾浩鼎. 2004. 震源理论基础[M]. 北京: 地震出版社.
- 刘峡, 孙东颖, 马瑾, 等. 2014. GPS 结果揭示的龙门山断裂带现今形变与受力——与川滇地区其他断裂带的对比研究[J]. 地球物理学报, 57(4): 1091–1100.
- 盛书中, 万永革, 李红光, 等. 2013. 应用综合震源机制解法推断南通市地壳应力场方向[J]. 地球物理学进展, 28(3): 1297–1303.
- 屠泓为, 万秀红, 赵燕杰, 等. 2014. 西宁盆地周围区域中小地震震源机制解的计算及其构造意义[J]. 地球物理学进展, 29(1): 148–154.
- 万永革, 盛书中, 许雅儒, 等. 2011a. 不同应力状态和摩擦系数对综合 P 波辐射花样影响的模拟研究[J]. 地球物理学报, 54(4): 994–1001.
- 万永革, 吴逸民, 盛书中, 等. 2011b. 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[J]. 地球物理学报, 54(11): 2809–2818.
- 熊熊, 许厚泽, 腾吉文. 2001. 青藏高原物质东流的演示层力学背景探讨[J]. 地壳形变与地震, 21(2): 1–7.
- 徐锡伟, Tapponnier P., VanDerWoerd J., 等. 2003. 阿尔金断裂带晚第四纪左旋走滑速率及其构造运动转换模式讨论[J]. 中国科学(D 辑), 33(10): 967–974.
- 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[J]. 地球物理学进展, 30(5): 476–486.
- 曾融生, 孙为国. 1992. 青藏高原及其邻区的地震活动性和震源机制以及高原物质东流的讨论[J]. 地震学报, 14(s1): 534–564.
- 张国民, 张培震. 2000. “大陆强震机理与预测”中期学术进展[J]. 中国基础科学, (10): 4–10.
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002a. 中国大陆现今构造变形的 GPS 速度场与活动地块[J]. 地学前缘, 9(2): 430–441.
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002b. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场[J]. 地学前缘, 9(2): 442–450.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008. 2008 年汶川 8.0 级地震震源断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 51(4): 1066–1073.
- 朱守彪, 张培震. 2009. 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震发生过程的动力学机制研究[J]. 地球物理学报, 52(2): 418–427.
- Aki E., 1996. Earthquake Generating Stress in Japan for Years 1961 to 1963 Obtained by Smoothing the First Motiom Pattern[J]. Bull. Earthq. Res. Int., 44: 447–471.

Tectonics Significances of Focal Mechanism Solution in Eastern Region of Balyankalla Block

TU Hong-wei¹, FAN Rong², YANG Xiao-xia¹, LUO Guo-fu³

(1. *Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China*)

(2. *China Earthquake Networks Center, Beijing 10036, China*)

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

Abstract

Combined with the tectonic background, and according to the calculation results of the focal mechanism solution of earthquakes in the eastern region of Balyankalla Block, we get the field stress state of three different area, and confirmed the theoretical mechanics background of “escaping to eastern” of Balyankalla Block. On the basis of analyzing the interaction theory of block structure, we try to interpret and infer the seismic properties and the forming reason of their stress state in different region. In addition, we elaborate the influence of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake on the regional structure. The results show that although the displacement rate is very low in some blocks border area, there still may occur large earthquake.

Key words: Wenchuan $M_s8.0$ earthquake; Balyankalla Block; field stress state; structure interaction