第29卷第4期 大地测量与地球动力学 Vol. 29 No. 4
2009年8月 JOURNAL OF GEODESY AND GEODYNAMICS Aug. ,2009

文章编号:1671-5942(2009)04-0042-06

九江-瑞昌5.7级地震余震震源机制解*

曾文敬 赵爱平 汤兰荣 李传江 邹水林
(江西省地震局,南昌 330039)

摘 要 基于层状介质中的点源位错模型,利用流动台网记录,反演得到了九江-瑞昌5.7级地震的112个$M_L \geq 1.5$余震的震源机制解,对震源机制解结果的分析表明:1)九江-瑞昌5.7级地震的余震破裂走向的优势分布为NNW和NEE,倾角50~60°,滑动角-60~-100°;2)震源区应力场的主压应力轴方位呈近EW方向分布,主张应力轴方位近NS向,与江西北部构造应力场特征基本一致。

关键词 九江-瑞昌余震序列;震源机制解;归一频数分布;震源应力场;构造应力场
中图分类号:P315.63 **文献标识码**:A

FOCAL MECHANISM SOLUTIONS OF AFTERSHOCKS OF JIUJIANG-RUICHANG EARTHQUAKE

Zeng Wenjing, Zhao Aiping, Tang lanrong, Li Chuanjiang and Zhou Shuiling
(*Earthquake Administration of Jiangxi Province, Nanchang* 330039)

Abstract With the point source dislocation model in layered medium and using the records of mobile seismic network, we calculated the focal mechanism solutions of 112 $M_L \geq 1.5$ aftershocks of the Jiujiang-Ruichang earthquake. By analyzing the results, the conclusions are obtained: 1) The predominant rupture strikes of the Jiujiang-Ruichang earthquake aftershocks are NNW and NEE, its predominant dip angle is between 50 and 60°, and its predominant slip angle is between -60 and -100°; 2) The pressure axis of epicentre stress field is distributed in the near diretion of EW, and its tensile axis is distributed in the near diretion of NS. The predominant orientation of these solutions is close to the character of tectonic stress field in north Jiangxi.

Key words: aftershock series of Jiujiang-Ruichang earthquake; focal mechanism solution; normalizational frequence distribution; epicentre stress field; tectonic stress field

1 引言

研究地震震源机制的方法有多种,应用理论地震图方法就是其中之一[1]。由观测记录波形测定震源机制,具有精度高,需用的记录资料量少等优点而倍受重视。根据林纪曾等[2]的研究结果,该方法不仅在记录资料量多的情况下能够得到很好的结果,而且在资料相对少的条件下也可以得到令人满意的结果。胡新亮[3]研究了利用P、S波振幅比资料测定小震震源机制解的可靠性,认为影响震源机制解误差的因素很多,且中小地震的发生具有很强的随机性,由振幅比反演得到的中小地震的震源机制解不宜作为单体进行具体分析,但是在求取大量中小地震震源机制解的基础上,用统计方法提取平

* 收稿日期:2009-02-03
基金项目:地震科学联合基金(A07124);江西省社会发展科技攻关项目:九江-瑞昌地震破裂过程、序列特征及影响研究
作者简介:曾文敬,男,1978年生,工程师,主要从事地震监测工作。E-mail:footballandsun@sina.com

均信息和统计特征的变化,得到的结论应当是客观和恰当的,并可以克服由于实际观测台网局限造成测定小震震源机制的困难。

本文利用理论地震图方法,对九江-瑞昌地震流动台网记录的大量小震资料,测定小震震源机制解,统计地震震源机制各个参数每 10°间隔的归一频数分布,探讨地震应力场分布特征与区域构造应力场之间的关系。

2　方法和资料

P 波和 S 波的地表垂直分量最大值振幅比的对数可表示为[1]:

$$Q_l = \ln(\left|\sum_{m=0}^{2} A_m(\theta_S,\lambda,\delta)SV_m\right|) - \ln(\left|\sum_{m=0}^{2} A_m(\theta_S,\lambda,\delta)P_m\right|) + c_l \quad (l=1,2,\cdots,N) \qquad (1)$$

式中:θ_S、λ、δ 分别为震源位错面的方位角、倾角和滑动角; C_l 为依赖于台站位置的常数。设震源参数真值为 $\overline{Q}_S$、$\overline{\lambda}$、$\overline{\delta}$,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 $\overline{Q}_l = \overline{Q}_l(\overline{Q}_S,\overline{\lambda},\overline{\delta})$, $l=1,2,\cdots,N$。若层状介质中震源模型参数已知时,可用式(1)计算得到理论振幅比 $Q_l(l=1,2,\cdots,N)$,用理论最大振幅比值与相应观测资料拟合的方式能求解震源机制参数。

九江-瑞昌 5.7 级主震发生后的前 3 天,距震中 100 km 范围内仅有九江和南昌两个台站,且南昌台信号又没有接入江西省台网中心。因此,对该时段内的地震无法进行震源机制解研究。为此,我们收集了 2005 年 11 月 29 日—2006 年 12 月期间流动台网记录的的 112 个 $M_L \geq 1.5$ 地震资料作为本研究的基础数据(图1)。由此获得的九江-瑞昌地区的速度模型如表 1[4-5]。

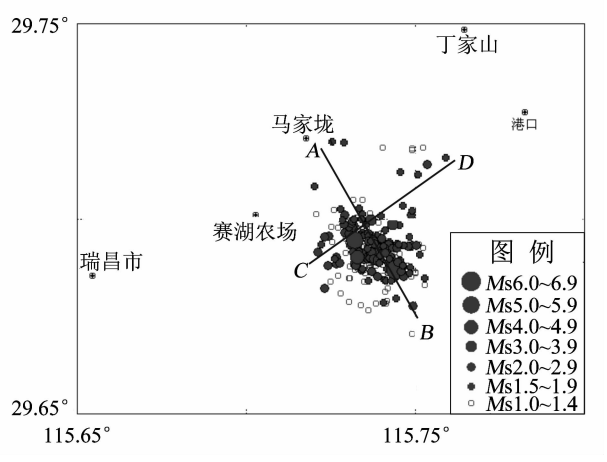


图 1　地震精确定位后的震中分布

Fig. 1　Distribution of accurately determined earthquake epicenters

表 1　九江-瑞昌地区的速度模型

Tab. 1　Velocity model in layer medium of the Jiujiang-Ruichang region

分层厚度(km)	P 波速度(km/s)	波速比
0 ~ 3	4.80	
3 ~ 10	5.80	
10 ~ 18	6.15	
8 ~ 26	6.40	1.71
26 ~ 35	6.80	
35	8.00	

3　结果分析

根据上述方法计算得到的 112 个地震的震源机制解参数如表 2。从表 2 可见,震源机制解呈不规则分布。通过对各震源机制解的各个参数进行空间取向分析,即每 10°间隔的归一频数分布,得到各参数的空间展布如图 2。

表 2　震源机制解计算结果

Tab. 2　Calcuated results of the focal mechanism parameters

年月日时分	纬度(°)	经度(°)	深度(km)	震级(Ms)	滑动角(°)	倾角(°)	走向(°)	滑动角(°)	倾角(°)	走向(°)	PAZ(°)	PIH(°)	TAZ(°)	TIH(°)	BAZ(°)	BIH(°)
2005-11-29T19:02	29.7	115.75	10	1.6	-166	63	53	-28	77	150	99	81	194	62	353	30
2005-11-29T23:46	29.69	115.73	10	1.6	168	66	165	25	79	70	205	65	299	81	48	27
2005-11-30T00:22	29.69	115.73	10	1.5	-29	82	297	-171	62	202	246	76	343	65	131	29
2005-11-30T00:23	29.69	115.73	10	1.9	-9	66	157	-156	82	63	292	79	198	67	46	25
2005-11-30T02:03	29.69	115.74	11	1.6	-22	69	164	-158	69	66	115	90	205	60	25	30
2005-11-30T02:49	29.69	115.74	10	2.1	-136	65	13	-33	51	125	252	81	152	42	350	49
2005-11-30T15:03	29.69	115.73	10	1.9	92	49	206	88	42	28	282	4	116	86	26	89
2005-11-30T16:04	29.70	115.73	14	2.7	59	84	101	168	31	201	220	47	346	58	97	60
2005-11-30T17:39	29.70	115.73	15	1.8	29	83	121	172	61	215	254	65	352	75	109	30
2005-12-01T01:29	29.70	115.74	13	1.5	-106	38	159	-77	53	318	237	82	4	13	146	80
2005-12-01T14:34	29.69	115.75	13	2.9	-145	53	221	-43	63	334	275	84	12	42	180	49
2005-12-01T18:47	29.71	115.75	13	1.7	-137	70	12	-27	50	120	250	78	148	46	351	47

(续表 2)

年月日时分	纬度 (°)	经度 (°)	深度 (km)	震级 (*M*s)	滑动角 (°)	倾角 (°)	走向 (°)	滑动角 (°)	倾角 (°)	走向 (°)	PAZ (°)	PIH (°)	TAZ (°)	TIH (°)	BAZ (°)	BIH (°)
2005-12-01T19:00	29.70	115.74	9	2.3	-106	44	199	-75	48	357	278	88	16	12	187	79
2005-12-02T04:54	29.70	115.74	9	1.5	-89	34	132	-91	56	314	223	79	48	11	314	89
2005-12-02T13:20	29.70	115.73	13	2.2	73	40	258	104	52	56	95	13	336	84	245	79
2005-12-02T17:34	29.69	115.74	10	2.5	-119	29	169	-75	64	317	238	72	18	23	143	76
2005-12-02T23:49	29.69	115.74	12	2.1	-125	55	206	-51	48	335	92	86	355	28	184	62
2005-12-03T02:29	29.69	115.73	11	1.5	-173	29	213	-61	87	309	244	55	12	49	131	61
2005-12-03T07:46	29.69	115.74	11	3.9	-90	34	260	-90	56	79	349	79	168	11	259	90
2005-12-03T13:15	29.69	115.73	10	1.5	-172	58	234	-32	83	329	277	73	16	63	159	33
2005-12-03T17:25	29.69	115.74	11	1.8	-141	22	218	-73	76	345	269	61	53	35	169	73
2005-12-04T00:37	29.71	115.74	7	1.6	-88	24	133	-91	66	315	224	69	47	21	315	89
2005-12-04T02:27	29.69	115.76	16	2.9	-2	30	187	-120	89	95	339	53	212	51	94	60
2005-12-04T05:15	29.69	115.74	9	1.6	-132	46	196	-55	58	324	258	84	359	30	164	61
2005-12-04T06:05	29.69	115.74	10	1.6	-131	47	196	-55	56	324	258	85	357	29	166	61
2005-12-04T07:36	29.70	115.73	13	1.8	89	24	263	90	66	82	172	21	353	69	263	90
2005-12-04T08:26	29.70	115.73	10	2.1	-116	38	185	-71	57	333	257	80	18	19	164	74
2005-12-04T18:58	29.69	115.75	13	1.5	-15	60	172	-150	77	74	306	79	209	59	54	33
2005-12-06T16:58	29.68	115.74	10	1.8	73	38	283	103	54	81	126	13	1	82	269	80
2005-12-07T14:21	29.69	115.74	9	2.2	-113	48	4	-67	47	152	258	89	167	17	349	73
2005-12-08T13:28	29.70	115.73	11	1.7	38	85	123	173	52	217	253	60	356	68	116	38
2005-12-12T00:36	29.69	115.74	10	2.0	-111	30	175	-79	63	332	250	73	37	20	157	80
2005-12-13T11:04	29.70	115.73	12	2.9	-113	44	173	-69	50	322	247	87	347	16	156	74
2005-12-15T09:17	29.69	115.75	12	2.1	-176	30	218	-60	88	311	247	54	14	51	133	60
2005-12-15T13:46	29.69	115.75	10	1.9	-160	50	53	-42	74	156	99	75	202	50	353	44
2005-12-15T22:58	29.69	115.74	10	2.0	-64	28	159	-103	65	8	268	71	122	23	3	78
2005-12-16T18:47	29.69	115.74	10	2.2	-87	32	157	-92	58	340	249	77	76	13	340	89
2005-12-16T19:13	29.69	115.74	10	1.9	-83	32	162	-95	58	351	258	77	95	13	349	86
2005-12-16T19:14	29.69	115.74	10	2.1	162	30	238	61	81	132	252	44	19	60	127	62
2005-12-16T19:44	29.69	115.74	11	1.6	-82	31	161	-95	60	351	257	75	94	15	348	86
2005-12-17T01:24	29.70	115.73	11	1.5	-174	60	235	-30	85	328	277	73	15	66	156	30
2005-12-17T12:59	29.70	115.72	13	2.0	53	84	113	170	38	212	237	50	354	61	109	53
2005-12-18T03:25	29.71	115.75	11	1.9	178	63	55	28	89	324	96	70	193	72	321	28
2005-12-19T03:44	29.69	115.75	10	2.1	-51	27	225	-108	69	88	344	68	205	28	81	73
2005-12-19T12:52	29.69	115.74	13	1.5	-126	43	266	-61	56	41	331	83	77	25	238	67
2005-12-19T23:38	29.69	115.74	10	3.1	-86	33	159	-93	57	343	251	78	82	12	342	88
2005-12-22T15:12	29.70	115.73	13	1.9	36	77	117	164	56	216	251	56	350	76	99	38
2005-12-22T20:37	29.69	115.73	9	2.3	-19	86	271	-176	71	180	224	79	317	73	103	20
2005-12-24T02:35	29.69	115.72	10	1.6	63	35	255	108	59	43	94	20	325	77	232	75
2005-12-24T08:20	29.70	115.73	12	2.2	-116	43	266	-68	52	53	339	85	84	18	247	73
2005-12-24T23:03	29.69	115.74	10	2.4	-101	31	176	-84	60	343	258	75	56	16	167	84
2005-12-25T01:47	29.69	115.75	7	1.8	-60	40	130	-112	56	347	241	81	127	21	334	71
2005-12-25T18:27	29.69	115.74	12	2.7	-105	33	210	-80	58	11	289	78	73	15	197	82
2005-12-26T22:54	29.68	115.75	13	1.9	-64	20	221	-99	72	68	331	64	172	28	65	81
2005-12-28T08:22	29.69	115.75	12	1.7	173	79	63	11	83	332	107	77	198	87	300	13
2005-12-29T04:01	29.69	115.74	13	1.6	8	79	330	169	82	61	106	77	15	88	276	13
2005-12-30T00:24	29.70	115.73	11	1.8	-140	28	221	-68	72	347	275	66	48	33	175	69
2006-01-01T17:38	29.68	115.74	9	1.9	-172	48	236	-42	84	331	276	66	22	57	157	42
2006-01-09T17:43	29.69	115.74	10	1.7	-143	57	206	-39	60	318	261	88	353	42	170	48
2006-01-11T23:09	29.69	115.74	10	1.7	-95	33	171	-87	57	344	257	78	63	12	166	87
2006-01-20T22:27	29.69	115.74	9	2.0	-164	26	208	-65	83	312	243	56	17	44	136	65

(续表 2)

年月日时分	纬度 (°)	经度 (°)	深度 (km)	震级 (*M*s)	滑动角 (°)	倾角 (°)	走向 (°)	滑动角 (°)	倾角 (°)	走向 (°)	PAZ (°)	PIH (°)	TAZ (°)	TIH (°)	BAZ (°)	BIH (°)
2006-01-24T12:01	29.72	115.84	16	1.9	108	47	106	71	46	312	121	13	29	89	299	77
2006-01-25T04:06	29.69	115.74	10	1.9	-110	31	165	-78	61	322	241	75	24	18	148	80
2006-01-25T17:25	29.70	115.73	13	1.6	-98	36	153	-84	55	323	237	80	30	11	146	85
2006-01-26T07:28	29.70	115.73	13	1.5	-101	36	158	-82	55	324	240	81	24	12	149	83
2006-02-01T18:32	29.69	115.74	9	2.5	-70	30	140	-101	62	342	244	74	98	19	337	80
2006-02-01T19:52	29.69	115.74	9	1.6	-105	51	356	-72	42	153	255	86	145	13	346	78
2006-02-03T19:12	29.69	115.74	10	1.5	149	84	209	7	59	116	257	64	159	73	39	31
2006-02-03T20:51	29.69	115.75	11	1.6	51	82	127	167	40	227	253	50	7	64	120	51
2006-02-04T01:20	29.68	115.74	11	1.9	-23	58	170	-146	71	68	301	82	205	53	42	38
2006-02-10T10:13	29.69	115.74	11	1.8	-94	38	322	-87	52	137	49	83	211	7	319	88
2006-02-11T05:04	29.73	115.80	15	1.5	-3	70	55	-160	88	324	191	77	98	74	318	21
2006-02-12T02:40	29.72	115.80	15	1.7	3	71	56	161	87	147	193	75	100	78	334	19
2006-02-13T17:02	29.69	115.75	12	1.8	-19	30	243	-119	81	137	24	60	256	43	132	62
2006-02-14T13:10	29.72	115.80	14	1.6	70	76	103	144	25	227	218	35	357	62	98	70
2006-02-15T18:16	29.69	115.74	12	1.5	-87	32	252	-92	58	75	344	77	171	13	74	88
2006-02-16T03:33	29.69	115.74	12	1.5	73	81	114	151	19	231	224	39	10	56	111	73
2006-02-19T13:35	29.71	115.75	11	2.2	176	75	57	15	86	326	101	76	193	82	312	16
2006-02-19T20:31	29.73	115.80	16	1.8	167	88	288	2	78	197	333	80	242	83	117	13
2006-02-26T10:11	29.68	115.74	10	1.7	-1	52	148	-142	89	58	290	64	186	64	57	38
2006-02-27T23:13	29.69	115.74	10	1.7	63	80	118	159	29	227	237	42	6	60	113	63
2006-03-18T14:46	29.69	115.75	12	2.3	-179	36	219	-54	90	310	250	56	9	55	130	54
2006-03-12T04:49	29.70	115.73	12	1.5	-174	52	218	-38	85	312	259	68	2	60	138	38
2006-03-14T19:45	29.70	115.74	11	1.6	36	59	295	144	60	46	81	44	351	90	260	46
2006-03-16T12:28	29.70	115.74	12	1.8	31	86	131	175	60	224	263	66	2	72	125	31
2006-03-21T04:33	29.69	115.74	10	1.5	-155	54	232	-39	70	338	282	80	21	49	180	43
2006-03-24T06:24	29.69	115.74	11	2.1	-154	26	229	-66	79	343	272	60	46	39	168	67
2006-03-26T06:41	29.69	115.75	12	1.5	12	74	130	163	78	223	267	70	176	87	78	20
2006-03-27T06:33	29.69	115.74	13	2.4	-74	51	195	-109	41	39	116	85	228	13	25	78
2006-04-01T12:21	29.73	115.80	14	1.7	-43	53	102	-135	57	343	223	88	131	36	315	54
2006-04-01T15:34	29.68	115.74	9	1.7	8	21	214	111	87	312	22	46	241	52	133	69
2006-04-06T23:37	29.69	115.74	12	1.5	-157	59	221	-33	70	323	270	83	5	53	171	38
2006-04-10T00:55	29.68	115.74	13	1.7	-112	36	174	-75	57	328	249	80	17	17	156	77
2006-05-02T22:13	29.72	115.81	15	1.6	-7	79	103	-169	83	12	238	87	147	78	339	13
2006-05-04T23:36	29.65	115.71	5	1.8	-64	62	101	-130	37	327	29	77	147	27	293	67
2006-05-07T20:32	29.71	115.78	14	1.7	-149	35	111	-59	73	228	160	68	281	38	57	61
2006-05-09T10:10	29.69	115.75	12	2.6	6	51	139	141	85	233	284	60	180	67	60	40
2006-05-17T10:52	29.73	115.80	13	2.0	-20	70	166	-159	71	69	297	89	207	62	28	28
2006-06-04T10:41	29.69	115.73	12	1.8	-166	58	245	-33	78	342	290	76	28	59	179	35
2006-06-06T23:48	29.7	115.75	8	1.8	54	57	125	132	47	252	271	30	10	85	103	61
2006-06-07T03:20	29.69	115.75	9	1.5	-45	89	284	-179	45	193	229	61	338	59	104	45
2006-06-16T06:09	29.70	115.74	9	3.5	-27	86	359	-176	63	267	310	74	46	69	186	27
2006-06-17T01:37	29.70	115.75	9	1.7	15	65	157	154	76	254	298	62	204	83	100	29
2006-06-29T20:00	29.68	115.75	10	2.5	-44	46	22	-126	60	258	143	82	40	32	238	59
2006-07-01T04:12	29.70	115.75	9	1.7	-13	61	162	-150	79	66	297	78	200	61	47	32
2006-08-25T09:22	29.65	115.73	11	2.0	-10	64	149	-154	81	55	285	78	189	65	38	28
2006-09-08T19:58	29.63	115.73	9	1.8	114	35	58	74	58	266	35	18	165	78	257	76
2006-09-21T05:00	29.65	115.97	10	2.5	148	78	105	15	59	7	150	59	53	78	304	34
2006-10-05T22:46	29.64	115.73	10	1.8	109	45	12	72	48	218	20	13	115	89	206	77
2006-11-22T12:16	29.65	115.73	12	2.3	28	40	34	126	73	146	197	41	83	71	339	56
2006-11-25T00:34	29.64	115.73	10	1.7	-158	37	36	-55	77	144	81	66	199	43	333	56
2006-12-12T17:34	29.63	115.74	10	2.1	-153	63	40	-30	66	143	91	88	182	52	358	38

注:PAZ、TAZ、BAZ 分别为 P 轴、T 轴、B 轴的方位角,PIH、TIH、BIH 分别为 P 轴、T 轴、B 轴与垂线的夹角

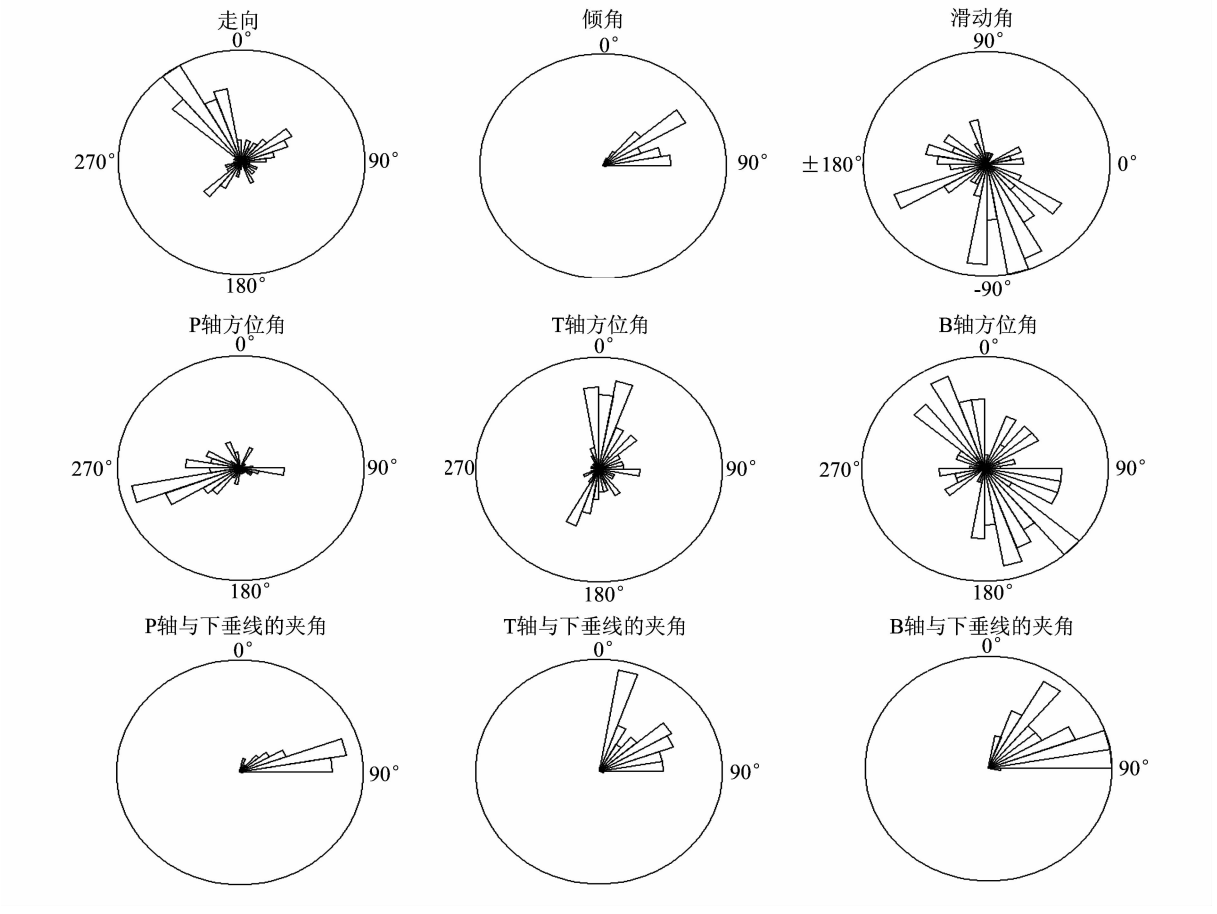


图 2 震源机制各个参数每 l0°间隔的归一频数分布

Fig. 2 Normalized frequence by 10° interval of the focal mechanism parameters

3.1 节面分析

图 2 中,节面走向的优势方向有两组,一组为 NNW 向(310 ~ 350°),另一组是 NEE(50 ~ 70°)向。其中,在 NNW 中又以 320 ~ 330°占优势;节面倾角大多为 50 ~ 60°,高倾角的也有一定比例,低倾角的甚少;节面滑动角主要在 -60 ~ -100°,其中 -70 ~ -80°居多,说明倾向滑动占优势。

文献[6 -7]反演主震震源机机制解,得到节面 II 的走向为 334° ~ 324°,倾角 55° ~ 64°,滑动角 16° ~ 18°。这组数据说明,主震破裂时滑动角约 16 ~ 18°,以走滑为主兼有逆断层分量。而余震序列震源机制解以 320 ~ 330°为主,倾角为 50 ~ 60°,表明余震活动主要为正断层性质。主震和余震以两种完全不同的运动方式出现,原因可能是在应力作用下,主震破裂以 16 ~ 18°的滑动角逆冲,震后由于应力松弛,故又以 -60 ~ -100°滑动角回落。在此运动过程中诱发了余震活动。

九江-瑞昌 5.7 级地震的余震序列发生在北西向襄樊-广济断裂带与北东向郯城-庐江断裂带的延伸的交而不汇的部位,构造十分复杂。主震微观震中位于长江南岸的瑞昌盆地内,震中区断裂构造发育。从表 2 得知,余震震源机制解节面走向的优势分布方向,与震中区北西向隐伏断裂和北东向断裂发育的地质构造特点相吻合,也与地震序列中 $M_L \geq 1.5$ 地震精确定位后的震中存在 NW 向和 NE 向优势分布相一致(图 1)。主震的发震构造目前尚未有定论,文献[7]认为可能是震中区北西向隐伏断裂,文献[8]认为可能是瑞昌盆地西北缘的丁家山-桂林桥-武宁 NE 向断裂北段,有待今后进行科学钻探深入研究确定。

3.2 应力轴分析

图 2 中,最大压应力主轴的优势方向为 SWW 或近 EW 向;P 轴与铅垂线的夹角以 70 ~ 90°高等角度占优势;最小压应力主轴的方位以近 NS 向占优势;T 轴与铅垂线的夹角近于直立或 10 ~ 20°分布占优势。上述 P 和 T 应力主轴优势分布与江西北部地区以近 EW 向挤压、近 NS 向拉张的构造应力场分布特征基本一致。说明九江-瑞昌 5.7 级地震序列活动受区域构造应力场的控制。

4 结论

1) 九江-瑞昌 5.7 级地震余震序列的破裂走向

为共轭分布,即 NNW 和 NEE 向,倾角以 50 ~ 60°居多,滑动角以 -60 ~ -100°居多。节面走向上两组优势分布方向与震中区两组活动的断裂相吻合。

2) 震源区 P 轴和 T 轴方位分别以近 EW 向和近 NS 向的优势分布,与江西北部近 EW 向挤压、近 NS 向拉张的区域构造应力场基本一致。表明在震源区应力释放和调整过程中,余震活动仍受控于区域构造应力场。

3)从归一频数分布的结果显示,震源区应力场在调整过程中,P 轴在近水平、T 轴在近直立角度的应力作用下,余震滑动显然表现出以倾滑为主,这与计算得到余震滑动角在 -60 ~ -100°居多相符。

致谢　衷心感谢刁桂苓研究员和吕坚同志的精心指导和帮助!

参　考　文　献

1　梁尚鸿,等. 利用区域地震台网振幅比资料测定小震震源参数[J]. 地球物理学报,1984,7(3):247 -257.

2　林纪曾,等. 粤东、闽南沿海小震震源参数的研究[J]. 地震学报,1991,13(4):420 -429.

3　胡新亮,等. 利用数字地震记录的 P,S 波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,2004,26(2):347 -354.

4　王椿镛,等. 大别造山带上部地壳结构的有限差分层析成像[J]. 地球物理学报,1997,40(4):495 -502.

5　王椿镛,等. 大别造山带地壳结构研究[J]. 中国科学(D 辑),1997,27(3):221 -226.

6　吕坚,等. 九江-瑞昌地震的精确定位及其发震构造初探[J]. 中国地震,2007,23(2) :166 -174.

7　吕坚,等. 2005 年 11 月 26 日九江-瑞昌 *M*s5.7、*M*s4.8 地震的震源机制解与发震构造研究. 地球物理学报,2008,51(1):159 -165.

8　李峰,翟杰,罗俊秋. 九江-瑞昌地震序列震源机制解探讨[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26,(增刊):123 -126.

(上接第 33 页)

3　Savage J C. Local gravity anomalies produced by dislocation sources[J]. J. Geophys. Res. ,1984,89:1 945 -1 952.

4　贾民育,等. 滇西重力场变化的二维图像及其与与 5 级以上地震的关系[J]. 地壳形变与地震,1995,15(3):9 -19.

5　付广裕,张勇军,刘少明. 昆仑山口西 8.1 级大地震前后重力场动态变化[J]. 大地测量与地球动力学,2003,23(1):42 -46.

6　祝意青,等. 新疆地区重力变化与伽师 6.8 级地震[J]. 大地测量与地球动力学,2003,23(3):66 -69.

7　刘善华,等. 华北地区强震前地壳垂直形变和重力异常[J]. 大地测量与地球动力学,2002,22(3):34 -39.

8　王勇,等. 重复绝对重力测量观测的滇西地区和拉萨点的重力变化及其意义[J]. 地球物理学报,2004,47(11):95 -100.

9　Dorigo M,Maniezzo V and Colorni A. The ant system: optimization by ant colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans. Syst. Man. Cybern-PartB,1996,26(1):29 -41.

10　刘宁,张永志. 位错模式的蚁群算法反演断层参数[J]. 大地测量与地球动力学,2009,29(1):52 -56.

11　Dorigo M L and Gambardella M. Ant colonies for thetraveling salesman problem,biosystems[J]. 1997,43:73 -78.

12　Okubo S. Potential and gravity changes raised by point dislocations[J]. Geophys. J. Int. ,1991,105:573 -586.

13　Okda Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space[J]. Bull. Seismol. Soc. Am. ,1985,75:1 135 -1 154.

14　李守巨,刘迎曦,孙慧玲. 基于蚁群算法的含水层参数识别方法[J]. 岩土力学,2005,26(7):1 049 -1 053.

15　陈双全,等. 地震波阻抗反演的蚁群算法实现[J]. 石油物探,2005,44(6):551 -553.

16　国家地震局地质研究所,国家地震局兰州地震研究所. 祁连山-河西走廊活动断层系[M]. 北京:地震出版社,1993.

17　丁国瑜,等. 中国岩石圈动力学概论[M]. 北京:地震出版社,1991.