

# 利用P波初动数据研究2021年云南漾濞 $M_s$ 6.4地震序列震源机制解及应力场\*

余海琳<sup>1</sup>, 万永革<sup>1,2,✱</sup>, 黄少华<sup>1</sup>, 崔华伟<sup>3</sup>

(1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 2. 河北省地震动力学重点实验室, 河北 三河 065201;  
3. 山东省地震局, 山东 济南 250000)

**摘要:** 为揭示2021年云南漾濞 $M_s$ 6.4地震的发震背景及其与区域应力场的关系, 搜集5月18日14时28分至6月8日5时53分的地震序列, 采用P波初动反演震源机制解的方法, 计算得到漾濞地震前后85次 $M_s \geq 2.5$ 地震的震源机制解。根据本次地震序列的震源机制解和近10年内滇西北地区地震的震源机制解, 利用网格搜索法反演了该区域的应力场, 最后模拟了主震的震源机制与区域应力场的关系。结果表明: 该区域主压应力方向为近南北向, 主张应力轴方向为近东西向。漾濞主震发生在剪应力最大的区域, 且剪应力的滑动角与发震节面的滑动角之差较小, 说明此次地震是在构造应力场作用下发生在剪应力最大释放节面上。

**关键词:** 漾濞 $M_s$ 6.4地震; P波初动; 震源机制解; 应力场; 最大剪应力

**中图分类号:** P315.727

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2021)03-0338-10

## 0 引言

根据P波初动数据反演震源机制解的方法得出的震源机制解快速精确, 是获得震源机制解的一种有效方法。这种方法最初是由Byerly (1938)提出, 主要思想是采用球极投影将震源位置以及相关信息投影到圆上, 借助几何知识, 给出断层要素的可能解, 但这种方式只适用于浅源地震; Hodgon和Storey (1953)在此基础上将震源深度看做是地球的厚度来进行研究, 将Byerly的方法从浅源地震推广到任意震源深度的地震; 郭增建 (1958)在Hodgon和Storey方法的基础上, 针对其不能根据地震台网求解震源机制解这一缺陷进一步改进, 使之更加适用于一般的情况, 并与实际相对应, 本文即采用该方法进行计算。

2021年5月21日21时48分34秒, 云南省漾

濞县(25.67°N, 99.87°E)发生 $M_s$ 6.4地震, 震前发生了多次前震, 震级最大5.6级, 震后又发生多次余震, 最大余震5.2级。中国地震台网中心、中国地震局地震预测研究所和国外机构等采用不同方法和资料得到主震的多个不同的震源机制解结果, 结果显示这次地震属于走滑型地震。为了更进一步研究此次地震的发震构造以及相关动力学机制, 需要利用更多云南漾濞地震序列的震源机制解。鉴于此, 本文基于中国地震台网中心提供的漾濞地震序列观测报告, 读取标有P波初动的地震事件, 利用P波初动法计算漾濞地震前震、主震以及余震的震源机制解。

## 1 方法及数据

本文所采用方法的主要思想为: 首先读取观测报告, 将观测报告中所有P波初动记录按照一

\* 收稿日期: 2021-06-07.

基金项目: 国家自然科学基金(42174074)、河北省地震科技星火计划(DZ20190415002、DZ20200827053)、中央高校科研业务费专项(ZY20215117)和河北省地震动力学重点实验室开放基金项目资助(FZ212105)联合资助。

第一作者简介: 余海琳(1998-), 硕士研究生, 主要从事构造应力场方面的研究. E-mail: 1534541141@qq.com.

✱通讯作者简介: 万永革(1967-), 研究员, 主要从事构造应力场、地震应力触发等方面的研究.  
E-mail: wanyg217217@vip.sina.com.cn.

定的数据格式重新排列，根据给定研究区域的速度模型以及台站的位置信息计算台站的方位角与离源角；最后对每个地震事件的P波初动的个数进行限制，只有满足条件的地震事件才进行震源机制解的反演。

根据P波初动数据进行震源机制解反演的可靠性依赖于数据资料的广泛性与可靠性。本文基于中国地震台网中心提供的5月18日14时28分至6月8日5时53分的漾濞地震序列的观测报告，选取5319条地震记录，其中 $3.0 \leq M_s < 4.0$ 地震82次、 $4.0 \leq M_s < 5.0$ 地震20次、 $5.0 \leq M_s < 6.0$ 地震3次。首先对所选地震记录进行P波初动的读取，然后在给定的区域速度模型下求取云南地区及周边135个能记录到这些地震事件的台站（图1）的方位角和离源角，为网格搜索震源机制解提供数据支持。本文选用的速度模型是由姜金钟（2013）在云南小湾水库地震进行精定位研究时提出的，以柯乃琛和华卫（2016）反演获得的该区域最小一维速度模型为基础，结合crust1.0模型（Laske *et al.*, 2015）得到本文使用的更为详细的地壳速度模型，见表1。

表1 震源机制解计算时使用的速度模型

Tab. 1 Velocity model used for the calculation of focal mechanism solution

层号	层界面的深度/km	每层的速度 $V_p/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
1	-2	3.7
2	0	4.2
3	3	5.2
4	5	5.7
5	10	5.9
6	15	6.04
7	20	6.15
8	25	6.30
9	30	6.70

2 震源机制解

2.1 震源机制解结果以及对比

本文对所选地震记录进行P波初动读取，共得到2543个P波初动数据，选择其中最少有8个P波初动的地震事件进行震源机制解求解，最终得

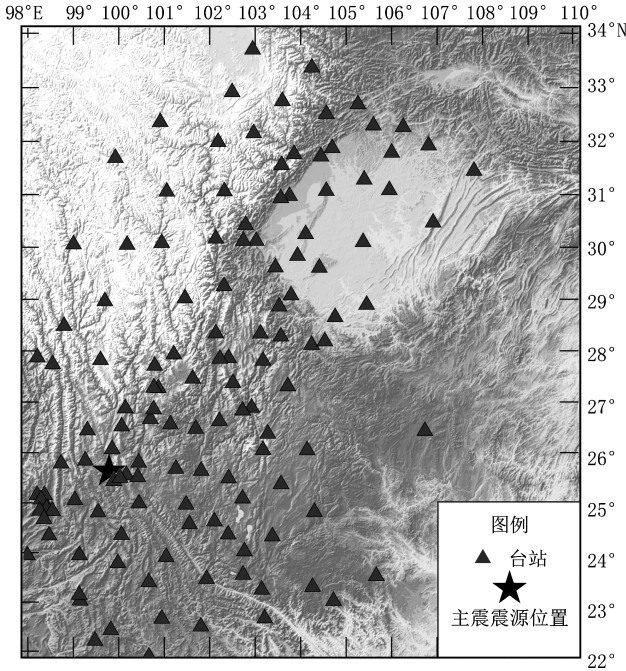


图1 本文选取台站位置分布

Fig. 1 Distribution of stations in this study

到85个 $M_s \geq 2.5$ 地震的震源机制解（表2）。P波初动的矛盾比是衡量震源机制准确性的重要指标，在表2中，矛盾比为0的震源机制解有26个，占总数的30.6%；矛盾比为0~0.10的震源机制解占总数的32.9%；矛盾比为0.1~0.18的震源机制解数占总数的30.6%；矛盾比大于0.18的震源机制解仅占总数的5.9%。根据Zoback（1992）在世界应力图中给出的震源机制解分类方法，可以判断出漾濞地震序列中正断型14个、走滑型40个、正走滑型1个、逆断型4个、不确定型26个，整个序列以走滑型震源机制解为主。按照其类型并结合地形图舍去距离 $M_s6.4$ 地震较远的6号震源机制解，得到 $M_s \geq 3.0$ 地震的震源机制解类型图（图2）。从图2可以看出，这些地震分布于走滑断裂维西—乔后断裂（常祖峰等，2016）南西方向，按照北西—南东的方式排列，与断裂带的走向一致。

为了进一步确定本文计算的漾濞 $M_s6.4$ 主震的震源机制解结果的稳定性与可靠性，本文将其与国内外研究机构 and 个人的计算结果进行比较，计算同一地震的最小空间旋转角（表3），再根据最小空间旋转角判断结果的准确性。由表3可见，本文的震源机制解与其它研究机构 and 个人的结果相比，最小空间旋转角的范围在 $20.33^\circ \sim 47.47^\circ$ 。

表 2 根据 P 波初动求解出的震源机制解  
Tab. 2 Focal mechanism solution determined by initial motion of P-wave data

序 号	发震时间			震中位置		$M_s$	节面 1			节面 2			P 轴		T 轴		B 轴		矛盾 比	P 波初 动个数
	年-月-日	时:分:秒	$\lambda_E/$ ( $^{\circ}$ )	$\varphi_N/$ ( $^{\circ}$ )	震源深 度/km		走向/ ( $^{\circ}$ )	倾向/ ( $^{\circ}$ )	滑动角/ ( $^{\circ}$ )	走向/ ( $^{\circ}$ )	倾向/ ( $^{\circ}$ )	滑动角/ ( $^{\circ}$ )	方位角/ ( $^{\circ}$ )	倾伏角/ ( $^{\circ}$ )	方位角/ ( $^{\circ}$ )	倾伏角/ ( $^{\circ}$ )	方位角/ ( $^{\circ}$ )	倾伏角/ ( $^{\circ}$ )		
1	2021-06-06	02:35:26.90	99.917	25.625	5	2.7	280	90	90	145	0	135	10	45	190	45	280	0	0.23	13
2	2021-06-05	14:53:38.20	99.976	25.598	7	3.0	304	36	149	60	73	58	173	21	293	52	70	30	0.09	11
3	2021-06-05	06:39:19.60	99.985	25.587	9	3.3	168	41	-105	8	51	-77	333	79	89	5	180	10	0.1	21
4	2021-06-05	06:31:27.40	99.988	25.581	10	3.3	118	73	170	212	80	18	344	5	76	19	240	70	0.05	20
5	2021-06-05	06:12:22.90	99.984	25.591	11	3.9	120	85	-171	30	81	-5	345	10	255	3	150	80	0.14	43
6	2021-06-03	20:29:07.30	99.524	25.125	11	2.5	60	90	90	285	0	135	150	45	330	45	60	0	0.11	9
7	2021-06-02	20:37:29.90	99.884	25.686	6	2.8	123	56	157	226	71	36	352	10	89	38	250	50	0.1	10
8	2021-06-02	05:12:05.20	99.931	25.563	5	3.2	140	44	-158	33	75	-48	344	44	93	19	200	40	0.06	18
9	2021-05-29	19:30:57.90	99.973	25.542	8	2.6	10	60	-90	190	30	-90	280	75	100	15	190	0	0.00	9
10	2021-05-29	02:39:27.00	99.902	25.663	14	2.6	130	90	90	355	0	135	220	45	40	45	130	0	0.24	17
11	2021-05-29	00:09:24.20	99.837	25.717	13	2.5	310	84	172	40	82	6	355	1	265	10	90	80	0.00	8
12	2021-05-28	22:05:08.30	99.863	25.693	12	3.2	316	82	130	55	41	12	16	26	263	39	130	40	0.00	17
13	2021-05-28	20:43:18.40	99.924	25.536	16	4.0	50	70	-90	230	20	-90	320	65	140	25	230	0	0.07	29
14	2021-05-28	00:27:05.10	99.886	25.674	2	2.8	310	81	177	40	87	9	175	4	265	9	60	80	0.00	10
15	2021-05-28	00:03:08.00	99.992	25.594	5	3.2	150	80	180	60	90	170	15	7	105	7	240	80	0.00	15
16	2021-05-27	23:03:57.30	99.884	25.690	14	3.9	113	81	110	227	22	26	187	33	46	50	290	20	0.12	33
17	2021-05-27	19:52:46.90	99.930	25.734	10	4.5	100	30	180	10	90	120	307	38	73	38	190	30	0.05	22
18	2021-05-27	13:36:47.40	99.941	25.733	8	2.6	36	61	102	193	31	71	117	15	333	72	210	10	0.14	14
19	2021-05-27	08:56:52.40	99.927	25.658	6	2.5	250	88	170	340	80	2	295	6	205	8	60	80	0.00	8
20	2021-05-26	14:20:32.20	99.938	25.731	8	3.3	253	56	127	19	48	48	318	4	220	60	50	30	0.18	17
21	2021-05-26	11:18:57.00	99.986	25.557	9	3.3	37	81	-110	283	22	-26	284	50	143	33	40	20	0.12	8
22	2021-05-26	09:22:59.90	99.879	25.676	10	3.0	120	73	122	236	36	31	187	21	67	52	290	30	0.12	16
23	2021-05-26	09:05:42.50	99.946	25.607	12	3.0	187	56	-157	84	71	-36	41	38	138	10	240	50	0.08	13
24	2021-05-26	06:37:24.40	99.910	25.664	10	3.5	329	85	150	62	61	6	19	17	281	24	140	60	0.00	12
25	2021-05-25	10:53:27.90	100.031	25.542	5	3.0	140	90	0	230	90	180	5	0	95	0	0	90	0.00	8
26	2021-05-25	03:10:29.70	99.979	25.588	6	2.7	320	80	180	230	90	170	185	7	275	7	50	80	0.00	10
27	2021-05-25	01:20:28.00	99.985	25.591	7	2.7	330	81	-177	240	87	-9	195	9	285	4	40	80	0.06	16

续表 2

序 号	发震时间		震中位置		震源深 度/km	$M_s$	节面 1			节面 2			P 轴			T 轴			B 轴			矛盾 比	P 波初 动个数
	年-月-日	时:分:秒	$\lambda_E/$ ( $^{\circ}$ )	$\varphi_N/$ ( $^{\circ}$ )			走向/ ( $^{\circ}$ )	倾向/ ( $^{\circ}$ )	滑动角/ ( $^{\circ}$ )	走向/ ( $^{\circ}$ )	倾向/ ( $^{\circ}$ )	滑动角/ ( $^{\circ}$ )	方位角/倾伏角/ ( $^{\circ}$ )	( $^{\circ}$ )	( $^{\circ}$ )	( $^{\circ}$ )	( $^{\circ}$ )	( $^{\circ}$ )	( $^{\circ}$ )	( $^{\circ}$ )	( $^{\circ}$ )		
28	2021-05-23	17:26;13.90	100.016	25.557	10	3.3	310	90	150	40	60	0	359	21	261	21	130	60	0.00	12			
29	2021-05-23	15:39;21.20	99.942	25.590	15	3.2	170	90	130	260	40	0	227	33	113	33	350	40	0.12	16			
30	2021-05-23	13:28;37.20	99.945	25.586	10	2.8	110	90	0	200	90	180	335	0	65	0	0	90	0.12	8			
31	2021-05-23	12:04;30.90	99.948	25.603	13	2.8	310	80	180	220	90	170	175	7	265	7	40	80	0.00	10			
32	2021-05-23	11:44;01.90	99.921	25.619	10	2.9	150	90	0	240	90	180	15	0	105	0	0	90	0.12	8			
33	2021-05-22	23:30;16.90	99.963	25.578	8	3.5	290	50	-90	110	40	-90	200	85	20	5	110	0	0.11	18			
34	2021-05-22	22:49;30.20	99.937	25.611	20	3.2	142	84	-140	47	51	-8	12	32	268	22	150	50	0.09	11			
35	2021-05-22	22:30;05.80	99.937	25.595	7	3.8	310	80	180	220	90	170	175	7	265	7	40	80	0.00	10			
36	2021-05-22	20:40;40.50	99.937	25.599	18	3.2	122	84	-140	27	51	-8	352	32	248	22	130	50	0.17	12			
37	2021-05-22	20:21;04.40	99.936	25.602	7	2.8	300	87	171	30	81	3	345	4	255	9	100	80	0.18	11			
38	2021-05-22	17:24;16.60	99.906	25.658	17	3.9	149	85	150	242	61	6	199	17	101	24	320	60	0.00	22			
39	2021-05-22	17:21;27.30	100.113	25.402	13	3.0	336	64	164	73	76	27	203	7	297	29	100	60	0.09	11			
40	2021-05-22	17:19;60.00	100.111	25.399	8	3.1	110	0	0	200	90	90	110	45	290	45	200	0	0.19	16			
41	2021-05-22	17:09;18.40	99.888	25.674	8	2.5	143	71	-111	13	28	-43	24	58	249	23	150	20	0.00	8			
42	2021-05-22	16:50;56.40	99.931	25.655	11	3.2	120	73	122	236	36	31	187	21	67	52	290	30	0.07	14			
43	2021-05-22	16:19;02.90	99.963	25.622	15	3.0	332	84	-140	237	51	-8	202	32	98	22	340	50	0.17	12			
44	2021-05-22	12:40;17.00	99.898	25.676	5	3.3	148	41	-105	348	51	-77	313	79	69	5	160	10	0.20	15			
45	2021-05-22	11:17;03.10	100.006	25.568	10	3.2	120	88	170	210	80	2	165	6	75	8	290	80	0.11	9			
46	2021-05-22	11:05;23.50	99.996	25.572	9	3.1	170	90	170	260	80	0	215	7	125	7	350	80	0.00	9			
47	2021-05-22	10:45;04.00	99.998	25.580	5	2.9	266	53	115	48	44	60	338	5	236	69	70	20	0.00	10			
48	2021-05-22	10:23;05.30	99.947	25.573	6	2.9	300	82	-174	210	84	-8	165	10	255	1	350	80	0.12	8			
49	2021-05-22	09:48;01.00	99.878	25.673	12	4.0	300	82	174	30	84	8	165	1	255	10	70	80	0.03	35			
50	2021-05-22	08:36;47.40	99.895	25.676	6	3.8	318	41	-105	158	51	-77	123	79	239	5	330	10	0.11	18			
51	2021-05-22	05:54;14.70	99.999	25.572	9	2.7	280	10	90	100	80	90	190	35	10	55	280	0	0.17	24			
52	2021-05-22	02:00;58.20	99.831	25.553	11	2.6	133	80	-152	37	62	-11	358	27	262	12	150	60	0.07	14			
53	2021-05-22	01:50;18.20	99.965	25.612	16	3.9	299	71	173	31	83	19	164	8	256	18	50	70	0.00	26			
54	2021-05-22	01:36;06.50	99.947	25.622	6	4.1	277	62	169	13	80	28	142	12	238	27	30	60	0.07	28			
55	2021-05-22	00:56;07.40	99.891	25.626	14	3.8	330	30	-90	150	60	-90	60	75	240	15	150	0	0.05	22			
56	2021-05-22	00:27;51.60	99.899	25.676	8	2.9	144	36	149	260	73	58	13	21	133	52	270	30	0.12	8			

续表 2

序 号	发震时间			震中位置		震源深 度/km	$M_s$	节面 1			节面 2			P 轴			T 轴			B 轴			矛盾 比	P 波初 动个数
	年-月-日	时:分:秒		$\lambda_E/$ ( $^{\circ}$ )	$\varphi_N/$ ( $^{\circ}$ )			走向/ ( $^{\circ}$ )	倾向/ ( $^{\circ}$ )	滑动角/ ( $^{\circ}$ )	走向/ ( $^{\circ}$ )	倾向/ ( $^{\circ}$ )	滑动角/ ( $^{\circ}$ )	方位角/ ( $^{\circ}$ )	倾伏角/ ( $^{\circ}$ )	方位角/ ( $^{\circ}$ )	倾伏角/ ( $^{\circ}$ )	方位角/ ( $^{\circ}$ )	倾伏角/ ( $^{\circ}$ )					
57	2021-05-22	00:21:06.20		99.994	25.594	19	2.8	166	71	-144	63	56	-23	29	38	292	10	190	50	0.00	8			
58	2021-05-21	23:08:57.80		99.979	25.600	12	3.6	310	80	178	40	88	10	175	6	265	8	50	80	0.12	17			
59	2021-05-21	22:31:10.90		99.982	25.591	16	5.3	4	61	-102	207	31	-71	247	72	103	15	10	10	0.22	27			
60	2021-05-21	22:30:27.10		99.891	25.675	12	3.8	306	64	164	43	76	27	173	7	267	29	70	60	0.05	22			
61	2021-05-21	22:27:11.70		99.973	25.607	8	2.9	130	90	100	220	10	0	210	44	50	44	310	10	0.11	9			
62	2021-05-21	22:19:48.00		99.946	25.605	17	3.8	337	62	169	73	80	28	202	12	298	27	90	60	0.08	13			
63	2021-05-21	22:15:16.30		99.979	25.590	13	4.2	120	81	175	210	85	9	345	3	75	10	240	80	0.16	32			
64	2021-05-21	22:13:46.00		99.897	25.677	10	3.2	360	10	180	270	90	100	190	44	350	44	90	10	0.17	12			
65	2021-05-21	21:55:29.50		99.887	25.683	7	5.0	310	87	171	40	81	3	355	4	265	9	110	80	0.07	15			
66	2021-05-21	21:48:35.30		99.881	25.682	17	6.4	308	61	174	41	85	30	171	17	269	24	50	60	0.06	54			
67	2021-05-21	21:21:25.40		99.928	25.632	14	5.4	160	30	-90	340	60	-90	250	75	70	15	340	0	0.16	64			
68	2021-05-21	20:56:02.70		99.929	25.631	15	4.3	330	73	-122	214	36	-31	203	52	83	21	340	30	0.05	22			
69	2021-05-21	20:55:43.20		99.928	25.632	10	3.0	314	53	-115	172	44	-60	164	69	62	5	330	20	0.00	8			
70	2021-05-20	17:35:22.50		99.894	25.663	10	2.8	300	80	180	210	90	170	165	7	255	7	30	80	0.00	11			
71	2021-05-20	12:08:41.60		99.915	25.640	11	3.0	110	90	90	335	0	135	200	45	20	45	110	0	0.12	8			
72	2021-05-20	02:32:10.60		99.903	25.661	13	3.3	359	36	-126	221	62	-67	172	65	295	14	30	20	0.00	13			
73	2021-05-20	01:58:59.20		99.894	25.657	15	3.9	320	80	180	230	90	170	185	7	275	7	50	80	0.00	22			
74	2021-05-20	00:54:22.70		99.905	25.664	12	2.8	130	90	140	220	50	0	183	27	77	27	310	50	0.00	14			
75	2021-05-19	21:13:07.30		99.901	25.670	17	3.8	303	56	157	46	71	36	172	10	269	38	70	50	0.04	25			
76	2021-05-19	20:28:45.20		99.911	25.657	20	2.9	311	85	-150	218	61	-6	179	24	81	17	320	60	0.10	10			
77	2021-05-19	20:05:56.40		99.910	25.646	15	4.5	130	90	0	220	90	180	355	0	85	0	90	90	0.06	32			
78	2021-05-19	05:33:24.20		99.924	25.630	13	3.2	317	51	172	52	84	40	178	22	282	32	60	50	0.04	25			
79	2021-05-19	03:27:56.20		99.924	25.626	13	3.7	130	87	171	220	81	3	175	4	85	9	290	80	0.06	32			
80	2021-05-19	00:59:51.30		99.932	25.638	11	2.9	28	41	-105	228	51	-77	193	79	309	5	40	10	0.00	13			
81	2021-05-18	22:57:59.80		99.926	25.632	6	2.7	120	30	180	30	90	120	327	38	93	38	210	30	0.00	10			
82	2021-05-18	21:39:35.90		99.929	25.631	12	4.2	139	85	150	232	61	6	189	17	91	24	310	60	0.02	40			
83	2021-05-18	20:56:46.30		99.932	25.634	13	3.6	305	41	168	44	82	50	164	26	277	39	50	40	0.09	23			
84	2021-05-18	20:20:28.10		99.935	25.631	16	3.4	184	53	-115	42	44	-60	34	69	292	5	200	20	0.11	19			
85	2021-05-18	18:49:30.03		99.936	25.640	14	3.8	329	31	-163	225	81	-60	166	45	291	30	40	30	0	22			

考虑到我们统计 GCMT 和 USGS 测定的大地震震源机制的空间旋转角的差别平均为  $\sim 30^\circ$ ，本次求解的震源机制解的精度在允许范围之内，说明本文使用 P 波初动计算的震源机制解是可靠的。

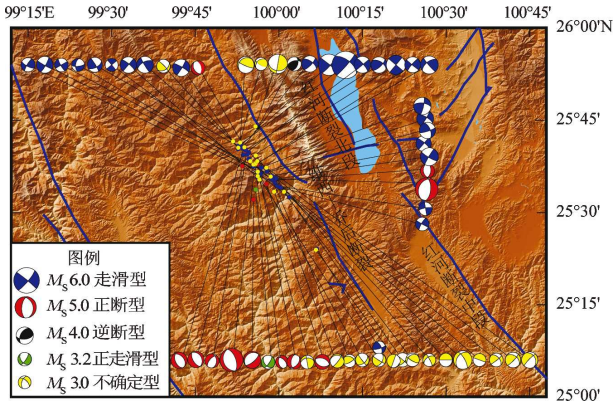


图 2  $M_s \geq 3.0$  地震的震源机制解及其分布  
Fig. 2 Focal mechanism solutions of the earthquakes with  $M_s \geq 3.0$  and their distribution

表 3 本文所求漾濞地震主震震源机制解和其它研究机构和个人结果的比较  
Tab. 3 Focal mechanism solutions got in this paper and the ones given by institutes and other authors

序号	机构或个人	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	最小空间旋 转角/(°)
1	本文	41	85	29	0
2	中国地震台网中心 <sup>①</sup>	45	70	-10	42.66
3	中国地震局地震预测研究所 <sup>②</sup>	46	89	-6	35.82
4	中国地震台网中心 <sup>①</sup>	44	77	11	20.33
5	王卫民 <sup>③</sup>	44	78.3	-17.5	47.47
6	USGS <sup>④</sup>	43	75	-9	39.63
7	GCMT <sup>⑤</sup>	46	78	4	27.11
8	CPPT <sup>⑥</sup>	222	71	-15	27.69
9	GFZ <sup>⑦</sup>	229	75	-1	34.62
10	雷兴林 <sup>⑧</sup>	44	77	-15	45.24

注：① <http://www.ief.ac.cn/>；② ⑦ ⑧ 私人通讯；③ <http://neic.usgs.gov/neis/FM/>；④ <https://www.globalcmt.org/>；⑤ <http://www-dase.cea.fr/>；⑥ <https://geofon.gfz-potsdam.de/>。

2.2 P 轴和 T 轴走向

将表 2 所示 85 个震源机制解的 P 轴和 T 轴进行投影，如图 3 所示。从图中可以看出，漾濞地震序列震源机制解的 P 轴优势方向为近南北向，T 轴优势方向为近东西向。

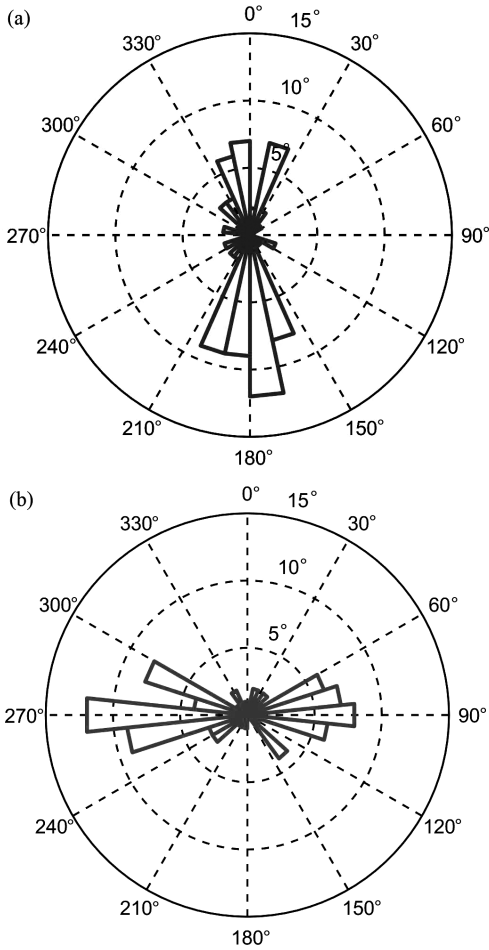


图 3 震源机制解的 P 轴 (a) 和 T 轴分布 (b)  
Fig. 3 Distribution of P - axis (a) and T - axis (b) of focal mechanism solution

3 应力场反演

为了揭示震源区的构造应力场特征，本文利用求得的漾濞地震序列震源机制解结合 GCMT 网站发布的 2011 年 1 月 1 日~2021 年 6 月 1 日滇西北地区 ( $25.00^\circ \sim 27.00^\circ \text{N}$ ,  $99.00^\circ \sim 101.00^\circ \text{E}$ ) 发生地震的震源机制解结果 (表 4)，采用网格搜索法 (Wan *et al.*, 2016) 对该区域进行应力场反演。

网格搜索法假设断层面上剪切应力的方向就是断层的滑动方向，将震源区进行网格划分，对每个网格内的应力张量都进行反演，并结合应力比  $R = (S_2 - S_3)/(S_1 - S_3)$  (其中  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  分别表示张应力、中间应力和压应力的大小) 判断这 3 个主应力的分布。在进行网格搜索法反演时，需要对网格搜索的参数进行设置，本文将走向、

倾角、滑动角以及  $R$  值的搜索步长分别设置为  $1^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $1^\circ$  和 0.01，置信区间选择为 90%，结果如图 4 所示。

表 4 滇西北地区地震的震源机制解 (据 GCMT)

Tab. 4 Focal solutions in Northwest Yunnan by GCMT

序号	发震日期	震中位置		$M_s$	走向/ 倾角/ 滑动角/		
		$\lambda_E/(^\circ)$	$\varphi_N/(^\circ)$		$(^\circ)$	$(^\circ)$	$(^\circ)$
1	2013-03-03	99.84	25.94	5.4	337	42	-113
2	2013-04-17	99.91	26.41	5.1	332	52	-131
3	2013-11-28	100.68	25.54	4.9	160	41	-71
4	2016-05-17	99.64	26.07	4.9	293	86	177
5	2016-05-17	99.63	26.10	4.8	14	45	-56
6	2017-03-26	99.82	25.75	4.6	321	85	179
7	2017-03-26	99.84	25.82	5.0	318	85	179
8	2019-07-21	100.77	26.11	4.8	27	77	-7

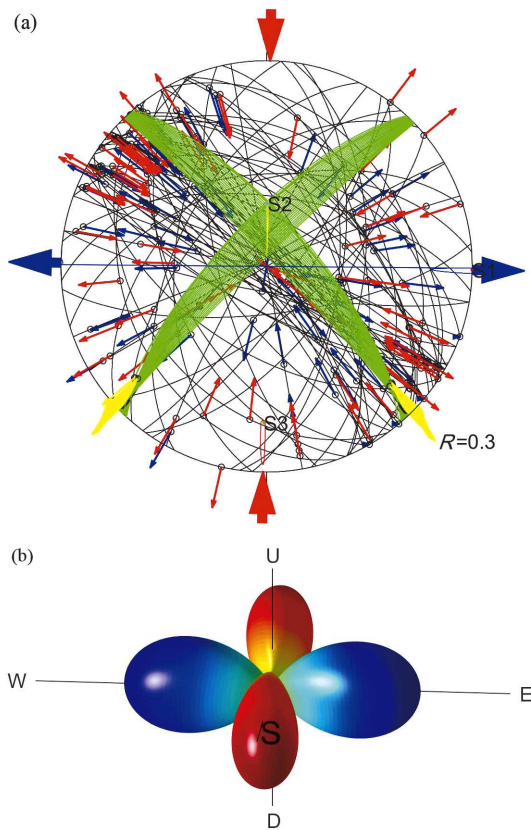


图 4 漾濞地震应力场反演结果 (a) 及三维示意图 (b)

Fig. 4 Results from stress field inversion of Yangbi earthquake (a) and 3D diagram (b) through focal mechanism solution

图 4a 为应力张量反演的等面积投影图，图中蓝色向内的箭头表示“可能断层面”的观测滑动方向；红色向外的箭头表示“可能断层面”上的理论滑动方向，两者在同一个“可能断层面”相距越近，表明理论滑动方向和观测滑动方向（滑动角）越为接近；绿色断层面表示置信水平为 90% 的应力场的最大剪应力节面；黄色箭头表示该节面的滑动方向； $S_3$ 、 $S_2$  和  $S_1$  周围的闭合曲线分别表示主压应力轴、中间应力轴和主张应力轴 90% 置信水平下的置信范围。图 4b 为云南漾濞地区应力张量反演结果的三维表示。图中 U 和 D 表示上和下；E、S、W 分别为东、南、西向；红色表示主压应力的相对大小和方向；蓝色表示主张应力的相对大小和方向 (Wan *et al.*, 2016)

使用网格搜索法计算可得主压应力轴走向的不确定范围为  $180.50^\circ \sim 182.10^\circ$ ，其倾伏角的不确定范围为  $4.00^\circ \sim 6.00^\circ$ ；中间应力轴走向的不确定范围为  $0.50^\circ \sim 2.00^\circ$ ，其倾伏角的不确定范围为  $64.00^\circ \sim 86.00^\circ$ ；主张应力轴走向的不确定范围为  $90.50^\circ \sim 92.00^\circ$ ，倾伏角的不确定范围为  $-1.00^\circ \sim 21.00^\circ$ 。应力比  $R=0.3$ ，根据  $R$  值的定义 (万永革等, 2011) 可以分析出，中间应力值更加靠近主压应力值，从选择的震源机制解中的“可能的断层面”来看，其走向的优势分布与地震序列的西北—南东走向分布对应 (图 4a)。滇西北地区主压应力方向为近南北向，主张应力轴方向为近东西向，与 Wan (2010)、Xu 等 (1992) 所给出的中国大陆应力场中该区域的应力场方向基本一致，这进一步说明本文计算的震源机制解的准确性。

#### 4 震源机制与应力场的关系

本文在探究漾濞主震震源机制与应力场关系的过程中，采用万永革 (2020) 提出的震源机制解与应力体系关系模拟研究的方法，这种方法模拟了 3 种应力体系状态，给出每种应力状态下可能的震源机制解分布，并探究不同类型震源机制解的数目与  $R$  值的关系。采用前文计算的应力场参数：压应力轴走向为  $181.00^\circ$ 、倾伏角为  $25.00^\circ$ 、张应力轴走向为  $91.00^\circ$ 、倾伏角为  $0.00^\circ$ ， $R =$



0.3, 震源机制解选取本文得出的主震震源机制解的其中一个节面, 走向  $309^\circ$ 、倾角  $61^\circ$ 、滑动角  $174^\circ$ , 进行应力场与震源机制解的关系模拟, 得到如图5所示在该应力体系下的震源机制解以及相对剪应力和相对正应力。

由于模拟时采用的应力大小是相对的, 是将震源机制解节面的正应力和剪应力用最大剪应力进行归一化, 因此震源机制解会存在误差。但从图5可以看出, 云南漾濞地震的主震不论是计算时给出的节面还是与之垂直的节面, 都处于剪应力最大的区域, 而从正应力图上来看, 该地震处于正应力抑制节面。应力张量在节面 I (走向  $308.0^\circ$ 、倾角  $61.0^\circ$ ) 上的相对剪应力和相对正应

力分别为 0.891 和  $-0.300$  (最大相对剪应力为 1), 剪应力的滑动角为  $-165.4^\circ$ , 与该节面的观测滑动角  $174.27^\circ$  仅相差  $20.13^\circ$ ; 在节面 II (走向  $40.9^\circ$ 、倾角  $84.8^\circ$ ) 上的相对剪应力和相对正应力分别为 0.915 和 0.375, 剪应力的滑动角为  $4.9^\circ$ , 与节面的观测滑动角  $30^\circ$  滑动仅相差  $25.1^\circ$ , 剪应力的滑动角与震源机制解对应节面的滑动角之间的角度相差不大。综合图5以及计算结果可以得出, 漾濞  $M_s6.4$  地震基本在构造应力场的最优释放节面上发生, 且主要在剪应力的作用下发生的, 震源机制解表现为走滑型, 发震断层也具有走滑性质, 这一结果验证了本文使用 P 波初动计算结果的准确性。

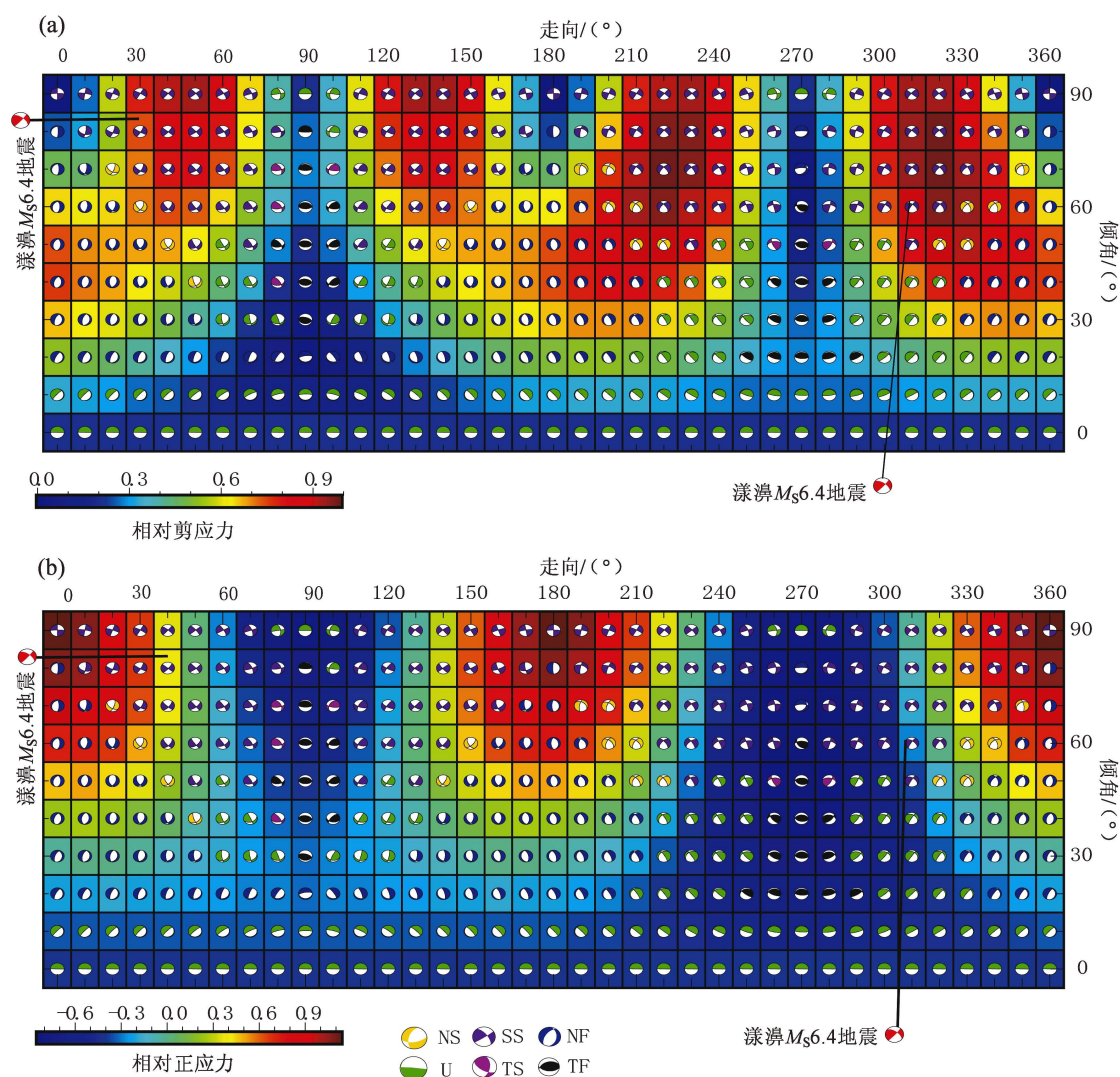


图5 云南漾濞震源区应力体系下的震源机制解以及相对剪应力 (a) 和相对正应力 (b) 的分布

Fig. 5 Relative shear stress and focal mechanism solution (a), normal stress under stress and focal mechanism solution (b) in Yangbi area, Yunnan Province



## 5 结论与讨论

本文根据中国地震台网中心的观测报告中 P 波初动信息,利用 P 波初动的方法对满足条件的地震事件进行震源机制解的反演,得到了 85 个震源机制解,筛选后对漾濞地震序列震源机制解和区域构造应力场进行研究得到以下结论:

(1) 漾濞地震序列的 85 个震源机制解的错动类型以走滑型为主,地震分布于维西—乔后断裂南西方向,按照北西—南东的方式排列,与断裂带的走向一致。

(2) 将利用 P 波初动得到的主震震源机制解与其它研究机构及个人结果进行对比发现,最小空间旋转角的范围在  $20.33^{\circ} \sim 47.47^{\circ}$ ,在允许的范围内,验证了本文结果的准确性。

(3) 利用所得出的震源机制解,结合近 10 年内滇西北地区地震的震源机制解反演区域应力场,可以得出:该区域应力场的主压应力方向为近南北向,主张应力轴方向为近东西向,与前人给出的滇西北地区应力场方向大体一致。

(4) 通过对震源机制解和应力场关系的研究,说明了云南漾濞地震主震基本在区域构造应力场的最优释放节面上发生,揭示了漾濞主震是在区域构造应力场的作用下发生的。

虽然本文是在特定的速度模型下得到的震源机制解,研究区有多种速度模型,但速度模型的改变通常不会引起震源机制解数值的较大变化。另外本文采用常规地震观测报告中台站的 P 波初动极性来求解震源机制解,如能进一步拾取更多的 P 波初动符号或许所得震源机制解会更为准确。由于缺少波形数据,未采用波形加初动的方法如 HASH 法 (Hardebeck, Shearer, 2002) 计算震源机制解并与之比较,但本文所得出漾濞地震序列的震源机制解类型以走滑型为主,选取的“可能断层面”的优势取向也与以北西—南东向地震序列大致吻合,根据震源机制解得到的应力场方向也与前人得到的应力场方向一致,这说明本文的震源机制经过多方面的验证,和目前的观测和认识有较好的一致性,结果还是可信的。

中国地震台网中心等多个机构和王卫民和雷兴林 2 位教授提供漾濞地震主震震源机制解;文中的图件采用 MATLAB 和 Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel, Smith, 1995) 绘制,审稿专家提出的宝贵修改意见,特此致谢。

## 参考文献:

- 常祖峰,常昊,臧阳,等. 2016. 维西—乔后断裂新活动特征及其与红河断裂的关系[J]. 地质力学学报,22(3):517-530.
- 郭增建. 1958. 由地震波初动求断层面方法的一些推广和改进[J]. 地球物理学报,7(1):20-30.
- 姜金钟. 2013. 云南小湾水库地震序列精定位研究[D]. 昆明:云南大学.
- 柯乃琛,华卫. 2016. 小湾水库库区最小一维速度模型研究[J]. 地震,36(2):38-47.
- 万永革. 2020. 震源机制与应力体系关系模拟研究[J]. 地球物理学报,63(6):2281-2296.
- 万永革,盛书中,许雅儒,等. 2011. 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.
- Byerly P. 1938. The earthquake of July 6, 1934: Amplitude and first motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 128: 1-22.
- Hardebeck J L, Shearer P M. 2002. A new method for determining first-motion focal mechanisms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 92(6):2264-2276.
- Hodgon J H, Storey R S. 1953. Table extending Byerly & fault-plane techniques to earthquakes of any focal depth[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 43(1):49-61.
- Laske G, Masters G, Ma Z, et al. 2015. Update on CRUST1.0 - A1-degree global model of Earth's crust[J]. EGU general assembly conference abstracts, 15:2658.
- Wan Y G. 2010. Contemporary tectonic stress field in China[J]. Earthquake Science, 23(4):377-386.
- Wan Y G, Sheng S Z, Huang J C, et al. 2016. The grid search algorithm of tectonic stress tensor based on focal mechanism data and its application in the boundary zone of China, Vietnam and Laos[J]. Journal of Earth Science, 27(5):777-785.
- Wessel P, Smith W H F. 1995. New version of the generic mapping tools[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 76(33):329-329.
- Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, et al. 1992. Tectonic stress field of China inferred from a large number of small earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 97(B8):11867-11877.
- Zoback M L. 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project[J]. Journal of Geophysical Research, 97(B8):11703-11728.

## Study on Focal Mechanism Solution and Stress Field of the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ Earthquake Sequence Using P-wave First Motion Data

YU Hailin<sup>1</sup>, WAN Yongge<sup>1,2</sup>, HUANG Shaohua<sup>1</sup>, CUI Huawei<sup>3</sup>

(1. *Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China*)

(2. *Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, Hebei, China*)

(3. *Shandong Earthquake Agency, Jinan 250000, Shandong, China*)

### Abstract

In order to reveal the seismogenic background of the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake in Yunnan Province and its relationship with the surrounding stress field, the dataset of the seismic sequence from 14:28 on May 18 to 5:53 on June 8 is collected. The focal mechanism solutions of 85 earthquakes with  $M_s \geq 2.5$  before and after the  $M_s6.4$  main shock are calculated by using the method of P-wave initial motion. Then, according to the focal mechanism solution, the stress field in the source region is inverted by using the grid search method. Finally, the focal mechanism of the main shock and the stress field around it are simulated. The results show that the direction of the main compressive stress is near NS direction, and the extensional stress axis is near EW direction. This result is roughly the same as that of the stress field in the mainland of China. Through the simulation of the stress field and focal mechanism, it is found that the main shock basically occurred in the area with the nearly largest shear stress, and the difference between the direction of the shear stress and the slip direction of the mainshock was small, which indicated that by the action of the tectonic stress field, the mainshock occurred on the nodal plane with maximum shear stress release.

**Keywords:** the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake; P-wave initial motion; focal mechanism solution; stress field; maximum shear stress