

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240927004

## 2024年新疆拜城5级震群活动特征研究\*

李金<sup>1,2,3</sup>, 孙业君<sup>2,3,4</sup>, 邓明文<sup>5</sup>, 姚远<sup>1,2,3</sup>

(1. 新疆帕米尔陆内俯冲国家野外科学观测研究站, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆乌鲁木齐 830011; 3. 中国地震局乌鲁木齐中亚地震研究所, 新疆乌鲁木齐 830011; 4. 江苏省地震局, 江苏南京 210014; 5. 库尔勒地震监测中心站, 新疆库尔勒 841000)

**摘要:** 2024年拜城5级震群活动具有明显的空间分区和时间丛集特征。在空间上,震群呈现三丛集中分布;在时间上,表现为三丛地震交替活跃,类似的5级震群活动在国内外较为罕见。本文基于新疆区域数字地震台网的观测资料,采用CAP方法中P波初动和波形拟合联合反演的算法,计算了2024年4月拜城5级震群序列的震源机制解和震源深度。同时,利用双差定位方法对该震群进行了重新定位,并在此基础上分析了拜城5级震群活动与库车凹陷地区构造运动的关系。初步结果显示,拜城震群中14次地震的震源机制均为逆冲型,表明此次震群为发生在南天山与塔里木地块交汇处的逆冲构造活动。根据重新定位后的深度剖面结果,推断I区和II区地震的发震构造可能为EW走向的断层;III区地震的发震构造可能为一条NNE向的断层。根据已有的地质资料,库车凹陷南部靠近塔里木盆地的构造为一套向北逆冲的逆断裂-背斜系统;而北部靠近南天山一侧则为一套向南逆冲的逆断裂-背斜系统。此次拜城5级震群活动基本可以反映库车凹陷南、北两侧逆冲系统的构造运动特征。此外,推断震区附近存在一条NNE向的断裂,该断裂斜穿了南天山地区的近EW向断裂,可能是库车凹陷东、中、西段NS向构造挤压变形的不等量缩短过程中形成的。此外,推断NNE向的断裂可能将震区EW向的断裂错断,形成了断裂交汇区,导致局部应力场不均匀,难以有效积累应力,从而形成了I区、II区和III区之间的地震空段。

**关键词:** 拜城5级震群; 震源机制解; 重新定位; 构造特征

**中图分类号:** P315; X43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0949-12

## Study on Characteristics of 2024 Baicheng M5 Earthquake Swarm in Xinjiang

LI Jin<sup>1,2,3</sup>, SUN Yejun<sup>2,3,4</sup>, DENG Mingwen<sup>5</sup>, YAO Yuan<sup>1,2,3</sup>

(1. Xinjiang Pamir Intracontinental Subduction National Observation and Research Station, Urumqi 830011, China;  
2. Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China;  
3. Urumqi Institute of Central Asia Earthquake, China Earthquake Administration, Urumqi 830011, China;  
4. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China; 5. Korla Earthquake Monitoring Center Station, Korla 841000, China)

**Abstract:** The 2024 Baicheng M5 earthquake swarm exhibited distinct spatial zoning and temporal clustering characteristics. Spatially, the earthquake swarm displayed a concentrated distribution in

\* 收稿日期: 2024-09-27; 修回日期: 2024-12-14

**基金项目:** 江苏省重点研发计划产业前瞻与关键核心技术(BE2023082)、新疆维吾尔自治区重点研发计划(2024B03018-3, 2022B03001-1)、中国地震局地震科技星火计划项目(XH21042)、中国地震局“监测、预报、科研”三结合课题(3JH-202001098、3JH-202301003)、中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(CEAIEF20230203)资助

**作者简介:** 李金(1986—),男,高级工程师。主要从事数字地震学及地震预测研究。E-mail: lijn6205@163.com

**通信作者:** 孙业君(1979—),男,正高级工程师。主要从事数字地震学及地震预测研究。E-mail: syj\_4116@126.com

three clusters. Temporally, it manifested as alternating seismic activity among these clusters. Such  $M_5$  earthquake swarms were relatively rare both domestically and internationally. Based on observational data from the Xinjiang regional digital seismic network, this study used a joint inversion algorithm combining P-wave first-motion and waveform fitting in the CAP method to calculate the focal mechanism solutions and focal depths of the Baicheng  $M_5$  earthquake swarm sequence in April 2024. Meanwhile, the double-difference relocation method was employed to relocate the earthquake swarm. Based on this, the relationship between the Baicheng  $M_5$  earthquake swarm activity and the tectonic movements in the Kuqa Depression area was analyzed. Preliminary results showed that the focal mechanisms of the 14 earthquakes in the Baicheng earthquake swarm were all thrust types, indicating that this earthquake swarm was the result of thrust tectonic activity that occurred at the junction of the South Tianshan Mountains and the Tarim Block. Based on the relocated depth profiles, it was inferred that the seismogenic structures of earthquakes in zones I and II were likely EW-trending faults, while the seismogenic structure of zone III was likely an NNE-trending fault. According to existing geological data, the southern part of the Kuqa Depression near the Tarim Basin featured a northward-thrusting reverse fault-anticline system. Conversely, the northern part near the South Tianshan Mountains was characterized by a southward-thrusting reverse fault-anticline system. The Baicheng  $M_5$  earthquake swarm could generally reflect the tectonic movement characteristics of the thrust systems on the south and north sides of the Kuqa Depression. In addition, it was inferred that an NNE-trending fault existed near the seismic zone, obliquely intersecting the EW-trending faults of the South Tianshan Mountains. This fault likely formed during differential shortening of NS-directed tectonic compressional deformation across the eastern, central, and western segments of the Kuqa Depression. Moreover, the NNE-trending fault might offset the EW-trending faults in the seismic zone, forming a fault junction zone that led to an uneven local stress field. This made effective stress accumulation difficult, thereby resulting in seismic gaps between zones I, II, and III.

**Keywords:** Baicheng  $M_5$  earthquake swarm; focal mechanism solution; relocation; tectonic characteristics

## 0 引言

2024年4月7日、8日、10日,新疆阿克苏地区拜城县分别发生 $M_s5.4$ 、 $M_s5.1$ 和 $M_s5.6$ 级地震。根据地震序列类型的定义,三次地震震级差 $\Delta M < 0.6$ ,构成震群型地震<sup>[1]</sup>,以下简称该震群为“拜城5级震群”。截至2024年5月31日,此次拜城震群共包括 $M_L \geq 1.0$ 地震654次,其中 $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震348次, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震220次, $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震68次, $M_L 4.0 \sim 4.9$ 地震13次, $M_L 5.0 \sim 5.9$ 地震5次(图1、图2)。

拜城5级震群表现出显著的空间分区和时间丛集特征,从空间上看,拜城5级震群活动范围较大,NE和NS方向的展布分别约60 km和50 km,并呈现出三丛集中分布特征(以下表示为I区、II区和III区)(图1、图2)。从时间上看,震群活动可分为三个阶段

(图1、图2(a)):第一阶段4月7~9日、第二阶段4月10日~5月22日、第三阶段5月23日~5月31日,且三丛地震呈现出交替活跃的特征。I区的地震在前两个阶段较为活跃(图2(b)),而II区(图2(c))和III区(图2(d))的地震则分别在第二和第三个阶段较为活跃。震群活动呈现明显的成丛分布且交替活跃的震例相对较少,2022年四川马尔康6.0级震群<sup>[2]</sup>和1997~2003年伽师6级强震群<sup>[3]</sup>等震例表明,这类震群通常发生在构造较为复杂的地区,其活动可能受到多条断层控制<sup>[4-5]</sup>,震中附近可能存在与主要断裂性质及展布有较大差异的隐伏断层<sup>[6]</sup>。

为深入揭示本次拜城5级震群的活动特征及构造背景,本文基于新疆区域地震台网记录到的拜城5级震群的资料,采用HypoDD方法对该震群序列进行重新定位;同时采用CAP方法反演序列中 $M_s \geq 3.5$ 地震的震源机制解。在此基础上分析拜城5级震群可能的发震构造。

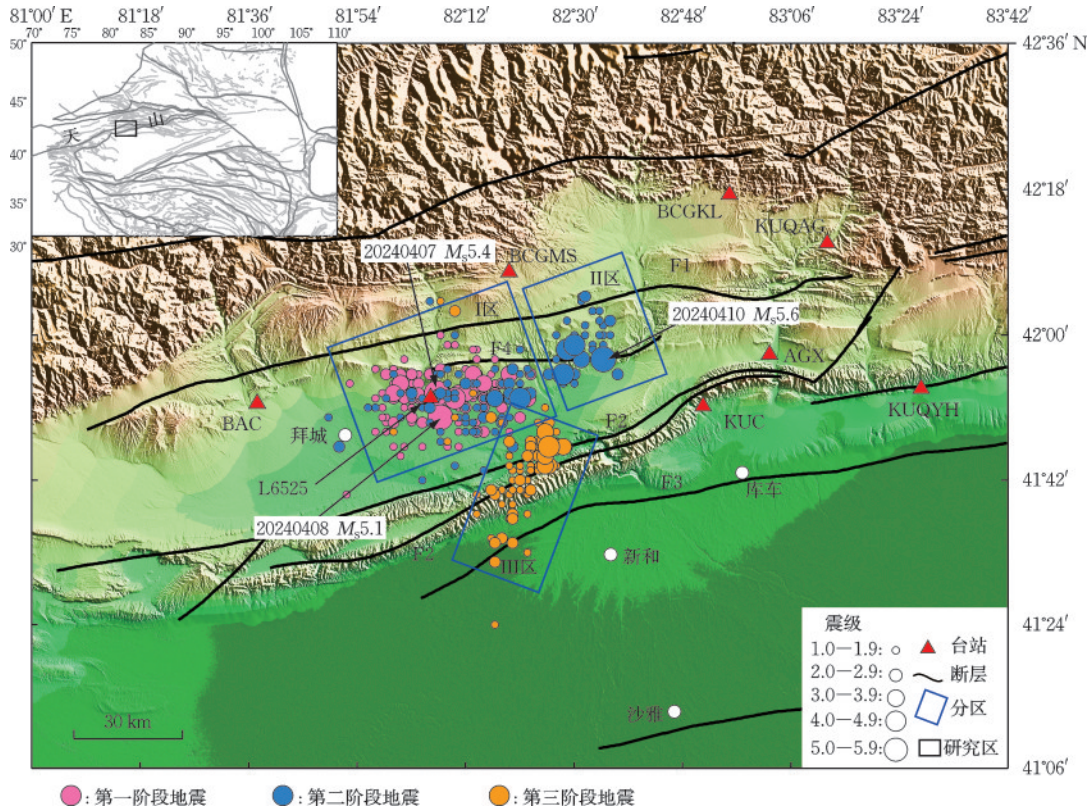


图1 拜城5级震群空间分布及各分区示意图(新疆区域地震台网编目数据)

Fig.1 Spatial distribution of Baicheng M5 earthquake swarm and schematic diagram of each subarea (based on catalog data from Xinjiang regional seismic network)

注:F1:库木格热木断裂,F2:秋里塔格断裂带(克孜尔断裂),F3:牙哈隐伏断裂,F4:喀桑托开断裂

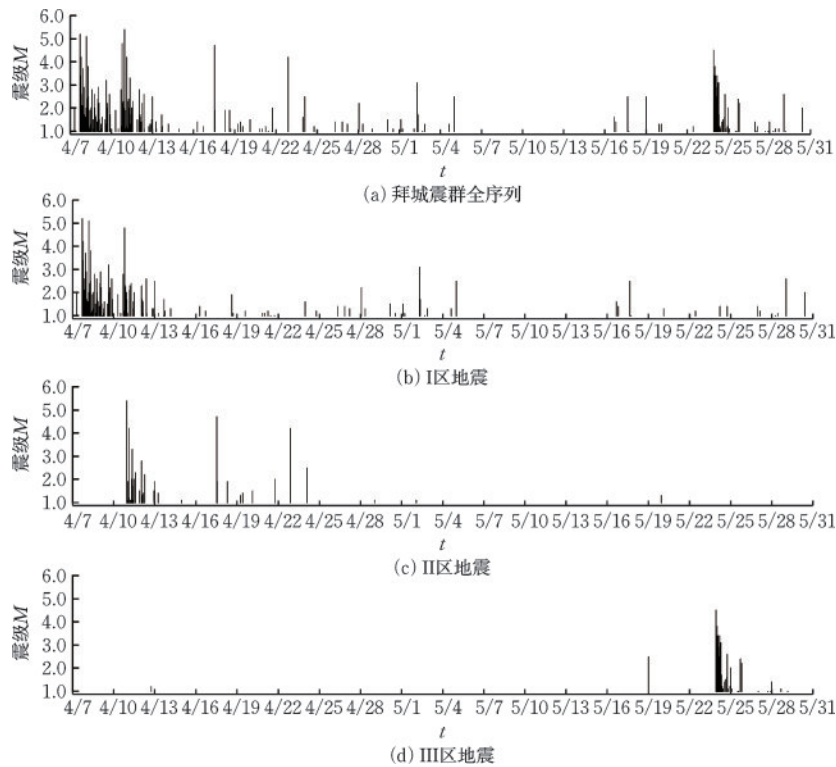


图2 拜城震群序列 M-t 图

Fig.2 M-t diagram of Baicheng earthquake swarm sequence

# 1 地质构造背景

拜城5级震群位于库车凹陷地区,该区域属于塔里木盆地和天山山体之间的挤压破碎带。库车坳陷在地质上具有古生代克拉通盆地基底的中、新生代沉积层;在地壳结构上,纵向、横向均存在不均一性,其高速层边缘扰动区制约着地震震源深度的分布,中地壳低速层的存在可能对地震的孕育有重要影响<sup>[7]</sup>。库车前陆褶皱—冲断带的构造变形样式极为复杂发育多种类型的逆冲断层、反冲断层、三角带、叠瓦冲断带和双重构造等<sup>[8]</sup>。拜城震群位于秋里塔格断裂带(F2)和库木格热木断裂(F1)之间,附近还分布有喀桑托开断裂(F4)。库车坳陷地区的构造主要以EW向延伸为主,同时存在明显的分段特征,东部依奇克里克构造带及其南部的东秋里塔格背斜、亚肯背斜属于东部构造区段;牙哈、库车以西至拜城附近为中部构造区段;拜城以西构造走向逐渐由NEE转为NWW或NW<sup>[9]</sup>。从地表变形来看,库车逆断裂—褶皱带及其附近吸收了大约5~6 mm/a的地壳缩短变形<sup>[10]</sup>。库车凹陷附近地区自1900年以来曾发生多次6—7级破坏性地震,如1947年8月23日6.3级地震、1949年2月24日7.3级地震、1979年3月29日6.0级地震等。

# 2 数据资料

震群周围50 km范围内有3个固定台站(图1),分别为米斯布拉克台(BCGMS)、拜城台(BAC)和库车台(KUC)。4月7日拜城5.1级地震发生后,新疆地震局立即前往震区架设流动台L6525,数据自4月8日12时开始汇入数据库,为后续研究提供了宝贵的近台波形资料。拜城5级震群位于拜城台(BAC)和库车台(KUC)之间(图1),根据刘文学等<sup>[11]</sup>的研究,天山造山带内部台站下的地壳厚度为50~65 km,其中BAC和KUC下方的地壳厚度分别为42±4.1 km和40.8±4.6 km,波速比分别为1.88±0.11和1.77±0.13,李昱等<sup>[12]</sup>利用流动宽频带地震台阵得到库车附近的地壳厚度为50 km左右,可见该区域研究结果相对较少,且差异较大,因此我们选用Crust1.0给出的该区地壳厚度50 km<sup>[13]</sup>,

波速比取值1.75。速度模型选择利用改进的体波面波联合成像算法得到的中国大陆岩石圈统一速度模型(USTClitho2.0)<sup>[14]</sup>,在拜城5级震群附近地区的初始速度模型进行计算(表1)。

表1 拜城震群周边地壳速度结构  
Table 1 Crustal velocity structure around Baicheng earthquake swarm

深度/km	P波速度/(km·s <sup>-1</sup> )	V <sub>p</sub> /V <sub>s</sub>
0	5.605	
5	5.793	
10	6.033	
15	6.110	1.75
20	6.000	
30	6.771	
40	7.432	
50	8.000	

# 3 震源机制及重新定位

## 3.1 震源机制

近些年,CAP方法已经得到广泛应用并取得了丰硕的研究成果<sup>[15-19]</sup>,该方法在拟合过程中将波形切成不同的部分进行独立的时间偏移,以减小反演结果对速度模型、地壳横向和纵向变化的依赖性<sup>[20-21]</sup>,在震源机制解算和震源深度确定方面具有较为明显的优势。基于表1给出的速度模型,采用CAP方法中P波初动和波形拟合联合反演的算法,按照台站的分布情况,筛选震中距≤400 km内14站的波形资料,反演了4月10日拜城5.6级地震的震源机制(图3)。计算了6~17 km间12个震源深度下各台站的格林函数,破裂时间设为1.0 s,首先在各深度对断层走向、倾角、滑动角以10°间隔进行搜索,得到的最佳矩心深度为11 km(图4),矩震级为5.28级,P轴方位347°,最佳双力偶机制解节面I:走向71°/倾角42°/滑动角81°;节面II:走向263°/倾角48°/滑动角98°。此外还计算了4月7日5.4、4月8日5.1级地震以及11次3、4级地震的震源机制解。3次5级以上地震的震源机制与国内外其他机构和学者的结果较为一致(表2),各机构给出的3次5级地震的震源深度差异较小,分别为12、12、11 km左

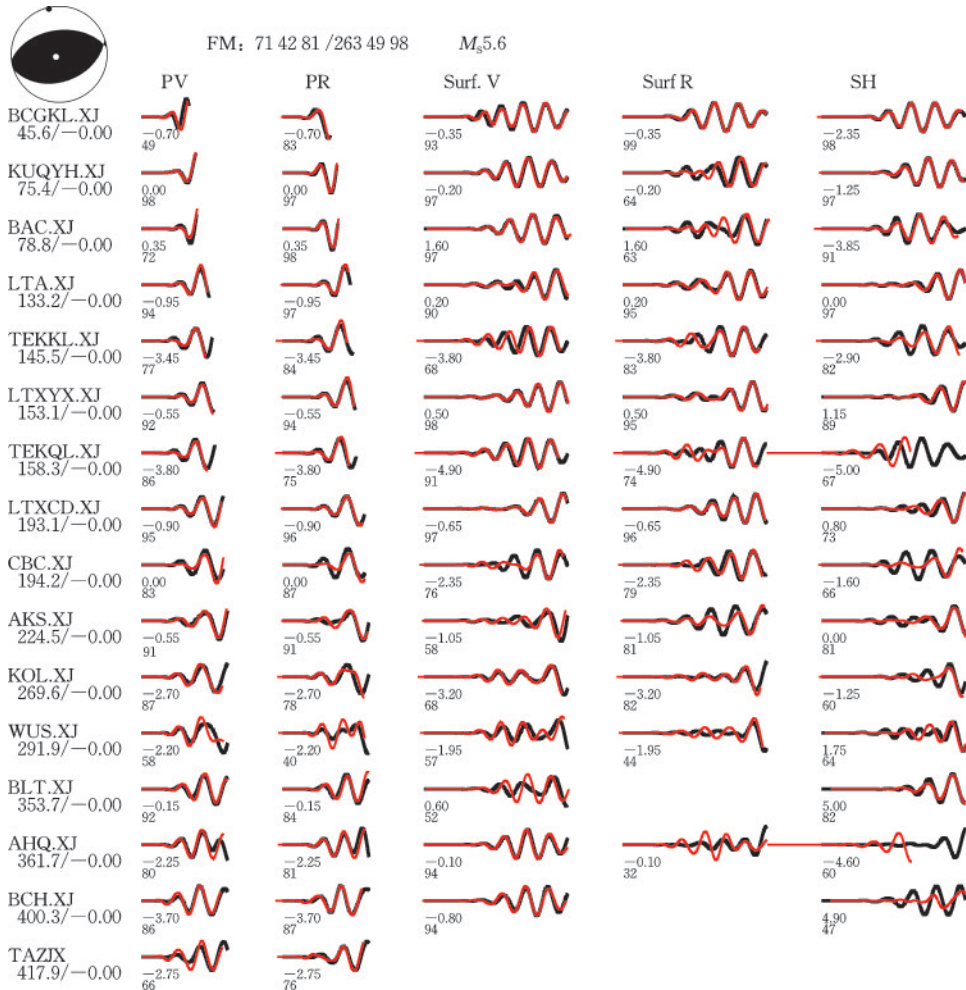


图3 2024年4月10日拜城5.6级地震矩张量反演理论地震波形(红色)与实际观测地震波形(黑色)

Fig.3 Theoretical seismic waveforms (red) from moment tensor inversion and observed seismic waveforms (black) of Baicheng  $M_{5.6}$  earthquake on April 10, 2024

注:PV、PR为Pnl的垂向和径向分量, Surf.V、Surf.R、SH分别为面波的垂向、径向、切向分量波形图下方第1行数字为各段理论地震波形相对实际观测波形的移动时间,正值表示理论观测波形相对观测波形超前;第2行数字为理论波形与观测波形的相关系数百分比;波形图左侧字母为台站,其下数字分别为台站震中距(km)以及理论地震图相对实际观测数据整体移动时间;震源球上黑色区域代表压缩区,白色区域代表拉伸区;震源球采用下半球投影

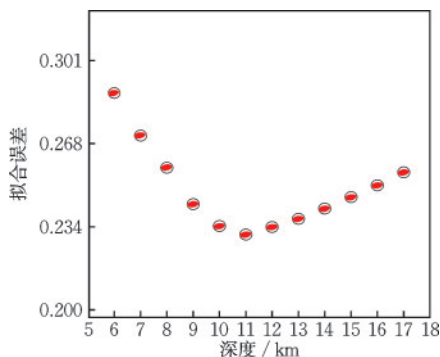


图4 2024年4月10日拜城5.6级地震矩张量反演中波形拟合误差随深度的变化

Fig.4 Variation of waveform fitting errors with depth in moment tensor inversion of Baicheng  $M_{5.6}$  earthquake on April 10, 2024

右。从震源机制类型来看,此次拜城5级震群序列均呈现出逆冲的性质,与震中周围历史地震的震源机制类型基本一致(表3、图5)。从P轴方位来看,I区的7次地震的P轴方位均呈NNE向,平均方向为 $17.21^\circ$ ;II区的4次地震的P轴方位呈近NNW向,平均方向为 $346.3^\circ$ ;III区3次地震的P轴方位一致性较差。整体来看,此次震群的P轴方位与震中附近区域应力场的方向基本一致,表明拜城5级震群活动受天山与塔里木地块挤压作用的控制。此外3个分区P轴方位的差异可能反映了3个分区应力场和发震断层的几何特征存在一定程度的差异。

表2 不同机构给出的拜城震群3次5级地震的震源机制解

Table 2 Focal mechanism solutions for three M5 earthquakes in Baicheng earthquake swarm provided by different agencies

发震时刻 (北京时间) 年-月-日 时:分:秒	震级 $M_s$	震级 $M_w$	CAP深度/km	节面 I/(°)			节面 II/(°)			震源球	来源
				走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角		
2024-04-07 16:46:18	5.40	5.2	13	97	50	93	272	40	86		本文
		5.4	12	91	51	99	256	40	79		Global CMT
		5.4	14	77	52	82	270	37	100		GFZ
		5.5	12	86	43	98	255	47	82		梁姗姗等 <sup>[22]</sup>
2024-04-08 04:47:59	5.10	4.9	14	113	38	91	291	52	89		本文
		5.1	10	75	56	79	274	34	105		GFZ
		5.1	13	82	53	93	257	37	86		梁姗姗等 <sup>[22]</sup>
2024-04-10 22:56:17	5.60	5.3	11	71	42	81	263	49	98		本文
		5.4	12	96	47	111	246	47	69		Global CMT
		5.4	11	78	67	89	260	23	92		USGS
		5.4	11	76	60	80	275	30	106		GFZ
		5.5	10	89	46	83	279	44	97		梁姗姗等 <sup>[22]</sup>

表3 拜城5级震群序列的震源机制解

Table 3 Focal mechanism solutions for Baicheng earthquake swarm sequence

序号	发震时刻(北京时间) 年-月-日 时:分:秒	震级 $M_s$	震级 $M_w$	CAP深度/km	节面 I/(°)			节面 II/(°)		
					走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
1	2024-04-07 16:44:05	3.8	3.86	13	282	48	80	117	43	101
2	2024-04-07 16:46:18	5.4	5.19	13	97	50	93	272	40	86
3	2024-04-07 19:03:09	4.2	4.47	10	106	59	71	320	36	118
4	2024-04-07 22:20:59	3.7	3.88	14	327	10	133	104	83	83
5	2024-04-08 04:47:59	5.1	4.94	12	291	52	89	113	38	91
6	2024-04-08 07:16:29	3.7	4.01	16	290	50	98	98	41	81
7	2024-04-10 18:57:39	4.8	4.41	11	102	47	77	301	45	104
8	2024-04-10 22:56:17	5.6	5.28	11	71	42	81	263	49	98
9	2024-04-11 02:53:50	4.5	4.35	7	259	48	99	66	43	80
10	2024-04-17 12:22:34	4.7	4.62	9	250	30	80	82	60	96
11	2024-04-22 21:08:48	4.2	4.37	12	82	56	96	251	34	81
12	2024-05-23 22:30:13	4.5	4.54	13	299	59	68	157	37	122
13	2024-05-24 00:05:55	3.8	3.96	14	269	48	82	101	43	99
14	2024-05-24 00:11:14	3.6	3.92	13	64	46	88	247	44	92

### 3.2 重新定位

我们基于全国统一编目数据和震相观测报告,采用 HypoDD 方法<sup>[23]</sup>对 2024 年 4 月 7 日~5 月 31 日拜城 5 级震群进行重新定位。HypoDD 方法在汶川 8.0 级、漾濞 6.4 级、九寨沟 7.0 级等地震序列定位中

得到了广泛的应用<sup>[24-26]</sup>。根据震中台站分布情况,挑选符合要求的地震事件(参与定位的台站数量 $\geq 4$ 个),共选取 10 733 条地震震相资料。经过配对,得到 P 和 S 波震相相对分别为 68 351 和 30 169,震相使用率分别为 84% 和 87%。重新定位过程中,要求震相数量 $\geq 6$ 个(符合此条件的地震个数为 676)。

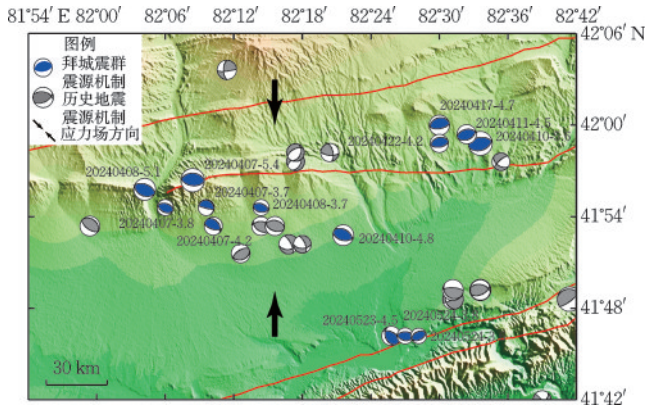


图5 拜城5级震群序列和周围历史地震的震源机制解平面图  
Fig.5 Plan view of focal mechanism solutions for Baicheng M5 earthquake swarm sequence and surrounding historical earthquakes

在计算过程中,采用共轭梯度法求解方程,经过2组共6次迭代后得到阻尼最小二乘法解,震源位置在水平向的平均估算误差为0.3~0.6 km,在垂直向的平均估算误差为0.6~1 km。

基于重新定位后的地震信息,以2024年4月7日5.4级地震为时间起点,考察了此次震群序列随时间的演化特征,其中颜色红至蓝代表了地震事件相距5.4级地震的离逝时间(图6)。4月7~9日震群中的地震主要在5.4和5.1级地震两边呈EW向扩展(I区),4月10日的5.6级地震位于I区的NEE方向30 km处,此后地震活动明显跳出I区范围,并逐渐形成地震活动II区,直至5月22日,地震活动主要分布在I区和II区。5月23日拜城4.5级地震位

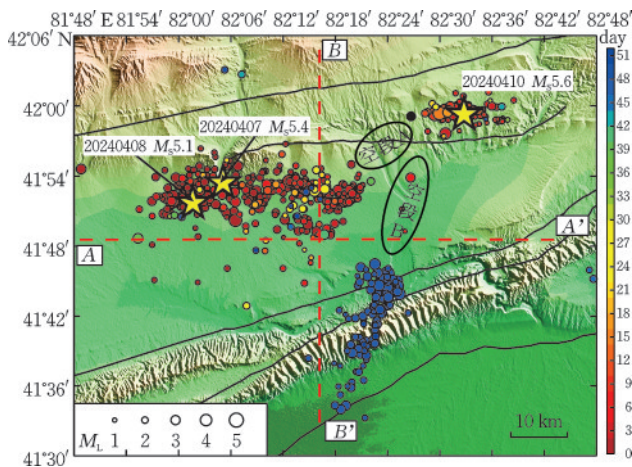


图6 重新定位后拜城震群的震中随时间的演化(4月7日—5月31日,  $M_L > 1.3$ )

Fig.6 Temporal evolution of epicenters of Baicheng earthquake swarm after relocation (April 7 to May 31,  $M_L > 1.3$ )

于I区和II区南侧20 km处,此后的地震活动大多分布在该地震附近,并逐渐形成III区,呈NE向分布(图1、图6)。相较台网编目定位结果,重新定位后三个分区的地震空间分布更为集中,边界更加清晰,成丛特征显著(图6)。此外,三个分区地震活动的空间展布更加有序,其中I区和II区的地震呈近EW向分布,而III区地震则呈NNE向分布。I区地震的空间展布较大,沿EW向约30 km,II区和III区地震分布长约10 km和25 km。从空间分布来看,I区和II区地震展布与震中附近的近EW向库木格热木断裂和克孜尔断裂的走向大体相近。III区地震展布与该区域近EW向的断裂走向存在明显差异。地震与断裂相关特征表明,三丛地震活动在发震构造和孕震环境存在明显差异,并呈现出复杂的特征。

从震源深度来看,82.7%的  $M_L 2.0$  级以上地震分布在10~18 km深度范围内,而  $M_L 4.0$  以上地震的深度主要集中在15~18 km范围内(图7(a))。此外3次5级地震的震源深度分别为15.6、15.2和17.5 km,均略深于CAP反演得到的矩心深度。分析认为,这两者的深度差异可能是重新定位后引起的整体偏差所致。尽管双差定位法最大程度地减少了地壳速度结构横向不均匀性带来的定位误差,但震源所在位置的速度结构和台网给定的初始震源深度仍然会对定位结果产生影响<sup>[27-29]</sup>。即便如此,定位后地震事件之间的相对位置依然较为可靠。

为了进一步分析此次震群活动与构造的相关性,根据重新定位后的地震空间分布作截面AA'和BB'(图6)。从剖面上震源深度随时间的演化来看,地震活动也大体分为独立的三丛,其分别代表了I区、II区和III区的地震活动,但是每一丛地震活动并未显现出明显的迁移或扩展特征,其原因可能受限于地震目录数据的精度。有研究报道,2013年芦山  $M_w 6.6$  地震序列经过微震识别重新构建目录后,可以观察到后续余震在沿主震破裂走向、垂直走向和上倾方向上表现出系统性的扩展现象<sup>[30]</sup>。由拜城震群AA'剖面可以看出(图7(a)),整个震群活动的震源深度自W向E有缓慢加深的趋势,由西侧的最深约15 km,向东逐渐加深至约18 km。由BB'剖面来看(图7(b)),地震活动明显分为三丛,自南向北分别对应II区、I区和III区地震活动,三个分区存在明显的地震空段。II区地震活动非常集

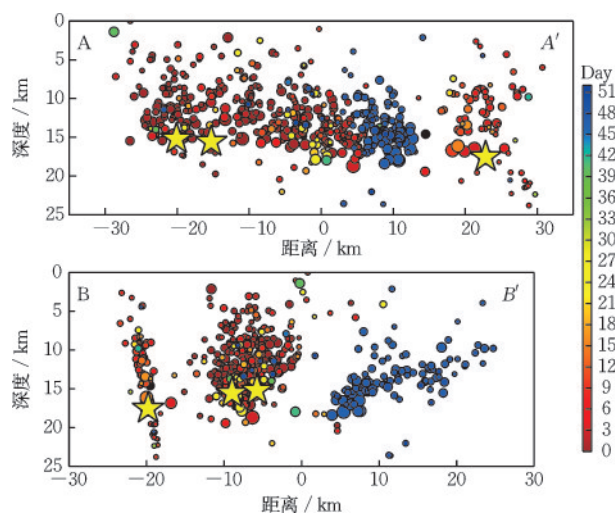


图7 拜城震群序列的优势方向的截面特征及其随时间的迁移特征

Fig.7 Cross-section characteristics along predominant direction of Baicheng earthquake swarm and its migration characteristics over time

中,呈线性分布在8~18 km深度范围,在垂向上表现出近直立的S倾特征;I区地震活动较为分散,呈团状分布,倾角特征不明显;III区的地震活动呈低倾角的N倾特征,震源深度自南向北逐渐加深。

#### 4 构造特征

此次拜城5级震群位于塔里木地块和天山之间的挤压凹陷地区。受控于塔里木周缘地区近NS向的挤压作用,导致天山山体地壳缩短以及两侧前陆盆地的形成<sup>[31-32]</sup>,因此附近地区所发育的活动断裂多呈现出EW向展布的特征,且断裂深度可达10~30 km<sup>[9]</sup>,与拜城5级震群的震源深度分布较为吻合,因此该震群活动可能与山前这组EW向的断裂密切相关。I区和II区地震的震源机制解节面走向均为近EW向,重新定位后的结果也显示,I区和II区的地震沿EW向展布,且节面解走向与地震展布相一致,这表明I区和II区地震的发震构造可能沿近EW向展布。综合剖面结果,推断认为II区地震的发震构造可能为近EW走向的,近直立的S倾断层;I区地震的发震构造也为EW的断层,但倾向特征尚不确定。总体上,I区和II区的发震构造与该区域近EW向展布的构造特征较为相符,可能与库车凹陷地区的库木格热木断裂和喀桑托开断裂关系密切;相较之下,III区地震主要呈NNE向25 km线性展布,表明发震构造可能为一条NNE向的断层,

但是该地区在地表并未发现NE向的构造活动<sup>[33]</sup>。从库车凹陷大范围来看,发育着一些NE和NW向的断裂,并且切穿EW向构造走向的活动断裂,这些断裂是库车拗陷东、中、西段NS向构造挤压变形的不等量缩短过程中产生的<sup>[9]</sup>,地壳缩短量表现为中段(拜城-库车)大,东、西两段小的特征,地表没有新活动的显示<sup>[33-36]</sup>。因此,推断认为III区附近可能存在隐伏断层,或针对已有断层开展工作不充分。

此外值得注意的是,此次拜城震群活动I区、II区和III区之间存在明显的地震空段,在此标记I区和II区的地震空段为(空段A),III区和I区、II区间的地震空段标记为(空段B)(图6)。根据上述对此次震群发震构造的分析,推测上述两个空段可能与震区附近NNE向断裂有关。虽然I区和II区的地震活动均呈EW向分布,但是II区地震位于I区的NE侧,而根据III区地震分布所勾勒出的NNE向断裂的延长线恰好穿过上述两个空段区域,因此推测这条NNE向的断裂可能将I区和II区地震EW向的发震断裂(可能为库木格热木断裂和喀桑托开断裂)错断,即EW向的断裂和NNE向的断裂在空段附近交汇,其表现为该区构造较为复杂,断裂间的性质特征不尽相同,导致局部应力场不均匀,使得应力难以有效积累<sup>[37-39]</sup>,导致地震活动在空段处出现减弱的现象,从而形成了上述地震空段。

库车拗陷总体以断坪-断块式的台阶状逆断层作为滑动机制,形成了盖层薄皮推覆构造带,发育了多种不同形态的断层相关褶皱<sup>[40-42]</sup>。南部靠近塔里木盆地的区域形成了一套向北逆冲的逆断裂-背斜系统,主要包括秋里塔格逆断裂-背斜带及其以南的亚肯背斜等新背斜;而北部靠近南天山的区域则形成了一套向南逆冲的逆断裂-背斜系统,其中最新活动的逆断裂-背斜带为喀桑托开逆断裂-背斜带<sup>[35]</sup>。该区晚第四纪以来的构造变形主要集中在喀桑托开逆断裂-背斜带、秋里塔格逆断裂-背斜带以及最南缘的亚肯逆断裂-背斜带之上<sup>[43]</sup>,这也是该区地震活动较为活跃的原因。

综合地震时空分布特征、震源机制、重新定位结果及震区的构造特征,推测拜城5级震群可能是多条断裂同时活动的结果。地震发震构造和发生机理较为复杂,体现了库车拗陷南、北两侧逆冲系统的构造运动,同时反映了天山构造带和塔里木盆地间强烈的构造挤压变形。

## 5 结 论

拜城5级震群活动具有明显的空间分区和时间丛集特征,呈现三丛集中分布,且三丛地震活动表现出交替活跃的特征,表明该震群活动的发震构造和孕震环境较为复杂。本文计算了此次震群的震源机制解并进行了重新定位,在此基础上分析了震群可能的发震构造。

(1)震群中14次 $M_s \geq 3.5$ 地震的震源机制均为逆冲型,节面走向均为近EW向, $P$ 轴方位总体呈近NS向的特征,但是三丛地震的 $P$ 轴方位存在一定差异。可能表明三个分区的应力场和发震断层的几何特征在某种程度上存在不同。

(2)I区和II区的地震沿近EW向展布,III区地震则呈NNE向分布。震群主要分布在10~18 km深度范围内,震源深度总体上呈自W向E逐渐加深的趋势,I区地震活动呈团状分布,倾角特征不明显,II区地震活动表现出近直立的S倾特征,而III区的地震活动呈现低倾角的N倾特征。从剖面上震源深度随时间的演化来看,地震活动分为三个区,但并未显现出明显的迁移或扩展特征,可能受限于地震数据的精度。

(3)I区和II区地震的发震构造可能沿近EW向展布,其中I区地震的发震构造倾向尚不确定,II区地震的发震构造可能为近EW走向的近直立S倾断层,与库木格热木断裂和喀桑托开断裂密切相关;III区地震的发震构造可能为一条NNE向的断层。拜城5级震群可能是多条断裂同时活动的结果,发震构造和发生机理较为复杂,是库车坳陷南、北两侧逆冲系统的构造运动,反映了天山构造带和塔里木盆地间强烈的构造挤压变形。

(4)此次拜城5级震群附近NNE向的断裂可能是三丛地震间存在地震空段的原因,NNE向的断裂将震区EW向的断裂错断,形成断裂交汇区,造成该区构造复杂,致使该区应力场不均匀,难以有效积累应力,从而形成了上述地震空段。

值得注意的是,拜城5级震群位于克拉气田附近地区,该区是我国西气东输的主力气源地,油气开采规模较大,且震群成丛分布特征与油气开采区地震活动特征有一定的相似性,该震群活动与油气开采相关性待进一步研究。

**致谢:**研究过程中与四川省地震局龙锋正高级

工程师、甘肃省地震局张辉副研究员、辽宁省地震局张博高级工程师、新疆维吾尔自治区地震局刘建明高级工程师就定位方法进行了多次有益的讨论,审稿专家提出了重要修改意见;文中部分图件采用GMT绘制。

## 参考文献:

- [1] 蒋海昆,曲延军,李永莉,等.中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征[J].地球物理学报,2006,49(4):1110-1117.  
Jiang H K, Qu Y J, Li Y L, et al. Some statistic features of aftershock sequences in Chinese mainland [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1110-1117. (in Chinese)
- [2] 宫悦,龙锋,赵敏,等.2022年6月10日四川马尔康 $M_s 6.0$ 震群序列时空演化特征[J].地震学报,2024,46(2):173-191.  
Gong Y, Long F, Zhao M, et al. The spatio-temporal evolution characteristics of the  $M_s 6.0$  Barkam earthquake sequence in Sichuan on June 10, 2022 [J]. Acta Seismologica Sinica, 2024, 46(2): 173-191. (in Chinese)
- [3] 赵翠萍,陈章立,郑斯华.1998~2003年伽师三次不同类型 $M_s 6$ 级地震震源破裂过程及短期内余震活动特征[J].地球物理学报,2008,51(4):1093-1102.  
Zhao C P, Chen Z L, Zheng S H. Source rupture process of 3 Jiashi  $M_s 6$  events (1998~2003) and its correlation with the aftershock activity [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(4): 1093-1102. (in Chinese)
- [4] 郭志,高星,路珍.2020年1月19日新疆伽师 $M 6.4$ 地震的重定位及震源机制[J].地震地质,2021,43(2):345-356.  
Guo Z, Gao X, Lu Z. Relocation and focal mechanism for the Xinjiang Jiashi earthquake on 19 January, 2020 [J]. Seismology and Geology, 2021, 43(2): 345-356. (in Chinese)
- [5] 李金,蒋海昆,魏芸芸,等.2020年1月19日伽师 $6.4$ 级地震发震构造的初步研究[J].地震地质,2021,43(2):357-376.  
Li J, Jiang H K, Wei Y Y, et al. Preliminary study for seismogenic structure of the  $M_s 6.4$  Jiashi earthquake on January 19, 2020 [J]. Seismology and Geology, 2021, 43(2): 357-376. (in Chinese)
- [6] Li J, Gao Y. Upper crust anisotropy of the 2020 Jiashi  $M_s 6.4$  earthquake [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1160676.

- [7] 蒋靖祥, 尹光华, 温和平, 等. 库车拗陷的地震孕震环境初探[J]. 地震地质, 2002, 24(3): 346-354.  
Jiang J X, Yin G H, Wen H P, et al. Primary study on seismogenic conditions of the Kuqa depression, Xinjiang [J]. Seismology and Geology, 2002, 24(3): 346-354. (in Chinese)
- [8] 汤良杰, 金之钧, 贾承造, 等. 库车前陆褶皱-冲断带前缘大型盐推覆构造[J]. 地质学报, 2004, 78(1): 17-25.  
Tang L J, Jin Z J, Jia C Z, et al. A large-scale salt nappe complex in the leading edge of the Kuqa Foreland fold-thrust belt, tarim basin, northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 17-25. (in Chinese)
- [9] 刘洁, 曲国胜, 童晓光, 等. 库车拗陷深浅构造变形与地震关系浅析[J]. 地震地质, 2004, 26(2): 236-247.  
Liu J, Qu G S, Tong X G, et al. A preliminary study on the relationship between basement-cover tectonic deformation and seismicity in kuqa depression [J]. Seismology and Geology, 2004, 26(2): 236-247. (in Chinese)
- [10] 王伟, 杨少敏, 谭凯, 等. 利用GPS资料分析天山现今地壳缩短速率[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(5): 59-63.  
Wang W, Yang S M, Tan K, et al. Present crustal shortening rate of tianshan Mountain with GPS data [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(5): 59-63. (in Chinese)
- [11] 刘文学, 刘贵忠, 周刚, 等. 新疆和周边地区地壳厚度和  $V_p/V_s$  比值变化的接收函数约束[J]. 地球物理学报, 2011, 54(8): 2034-2041.  
Liu W X, Liu G Z, Zhou G, et al. Crustal thickness and  $V_p/V_s$  ratio variations of Xinjiang and surrounding regions constrained by receiver function stacking [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(8): 2034-2041. (in Chinese)
- [12] 李昱, 刘启元, 陈九辉, 等. 天山地壳上地幔的S波速度结构[J]. 中国科学D辑:地球科学, 2007, 37(3): 344-352.  
Li Y, Liu Q Y, Chen J H, et al. Shear wave velocity structure of the crust and upper mantle underneath the Tianshan orogenic belt[J]. Science China Earth Sciences, 2007, 37(3): 344-352. (in Chinese)
- [13] Laske G, Masters G, Ma Z T, et al. Update on crust1.0-A1-degree global model of earth's crust[J]. Geophysical Research Abstracts, 2013, 15: 2658.
- [14] Han S, Zhang H, Xin H, et al. USTClitho2.0: updated unified seismic tomography models for continental China lithosphere from joint inversion of body-wave arrival times and surface-wave dispersion data [J]. Seismological Research Letters, 2022, 93(1): 201-215.
- [15] 韦生吉, 倪四道, 崇加军, 等. 2003年8月16日赤峰地震: 一个可能发生在下地壳的地震[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 111-119.  
Wei S J, Ni S D, Chong J J, et al. The 16 August 2003 Chifeng earthquake: Is it a lower crust earthquake? [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1): 111-119. (in Chinese)
- [16] 郑勇, 马洪生, 吕坚, 等. 汶川地震强余震( $M_s \geq 5.6$ )的震源机制解及其与发震构造的关系[J]. 中国科学D辑:地球科学, 2009, 39(4): 413-426.  
Zheng Y, Ma H S, Lyu J, et al. Source mechanism of strong aftershocks ( $M_s \geq 5.6$ ) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics [J]. Science China Earth Sciences, 2009, 39(4): 413-426. (in Chinese)
- [17] 吕坚, 王晓山, 苏金蓉, 等. 芦山7.0级地震序列的震源位置与震源机制解特征[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1753-1763.  
Lyu J, Wang X S, Su J R, et al. Hypocentral location and source mechanism of the  $M_s 7.0$  Lushan earthquake sequence [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1753-1763. (in Chinese)
- [18] 张致伟, 周龙泉, 程万正, 等. 芦山  $M_w 6.6$  地震序列的震源机制及震源区应力场[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2015, 40(10): 1710-1722.  
Zhang Z W, Zhou L Q, Cheng W Z, et al. Focal mechanism solutions of lushan  $M_w 6.6$  earthquake sequence and stress field for aftershock zone [J]. Earthquake Science-Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(10): 1710-1722. (in Chinese)
- [19] 祁玉萍, 孟令媛, 龙锋, 等. 锦屏一级水电站库区中小地震震源机制解与局部应力场特征[J]. 地球物理学报, 2024, 67(1): 189-204.  
Qi Y P, Meng L Y, Long F, et al. Characteristics of focal mechanism solution and local stress field of small to moderate earthquakes in Jinping hydropower station reservoir area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(1): 189-204. (in Chinese)
- [20] Zhao L S, Helmberger D V. Source estimation from broadband regional seismograms [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(1): 91-104.
- [21] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(5): 1634-1641.

- [22] 梁姗姗, 邹立晔, 刘艳琼, 等. 2024年3—6月中国大陆地区  $M \geq 4.0$  地震震源机制解测定[J]. 地震科学进展, 2024, 54(7): 476-482.  
Liang S S, Zou L Y, Liu Y Q, et al. Determination of focal mechanism solutions of the earthquakes with  $M \geq 4.0$  occurred in the mainland of China during March to June 2024[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(7): 476-482(in Chinese)
- [23] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm and application to the Northern Hayward fault[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(6): 1353-1368.
- [24] 黄媛, 吴建平, 张天中, 等. 汶川8.0级大地震及其余震序列重定位研究[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2008, 38(10): 1242-1249.  
Huang Y, Wu J P, Zhang T Z, et al. Relocation of the  $M 8.0$  Wenchuan earthquake and its aftershock sequence [J]. Science China Earth Sciences, 2008, 38(10): 1242-1249. (in Chinese)
- [25] 龙锋, 祁玉萍, 易桂喜, 等. 2021年5月21日云南漾濞  $M_s 6.4$  地震序列重新定位与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 2021, 64(8): 2631-2646.  
Long F, Qi Y P, Yi G X, et al. Relocation of the  $M_s 6.4$  Yangbi earthquake sequence on May 21, 2021 in Yunnan Province and its seismogenic structure analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(8): 2631-2646. (in Chinese)
- [26] 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2017年8月8日九寨沟  $M 7.0$  地震及余震震源机制解与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4083-4097.  
Yi G X, Long F, Liang M J, et al. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 8 August 2017  $M 7.0$  Jiuzhaigou earthquake and its aftershocks, northern Sichuan [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4083-4097. (in Chinese)
- [27] 苏金蓉, 郑钰, 杨建思, 等. 2013年4月20日四川芦山  $M 7.0$  级地震与余震精确定位及发震构造初探[J]. 地球物理学报, 2013, 56(8): 2636-2644.  
Su J R, Zheng Y, Yang J S, et al. Accurate locating of the Lushan, Sichuan  $M 7.0$  earthquake on 20 April 2013 and its aftershocks and analysis of the seismogenic structure [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(8): 2636-2644. (in Chinese)
- [28] 吕坚, 倪四道, 沈小七, 等. 九江—瑞昌地震的精确定位及其发展构造初探[J]. 中国地震, 2007, 23(2): 166-174.  
Lyu J, Ni S D, Shen X Q. Discussion on precise relocation and seismo-tectonics of the Jiujiang-Ruichang earthquake [J]. Earthquake Research in China, 2007, 23(2): 166-174. (in Chinese)
- [29] 吕坚, 郑勇, 倪四道, 等. 2005年11月26日九江—瑞昌  $M_s 5.7$ 、 $M_s 4.8$  地震的震源机制解与发震构造研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(1): 158-164.  
Lyu J, Zheng Y, Ni S D, et al. Focal mechanisms and seismogenic structures of the  $M_s 5.7$  and  $M_s 4.8$  Jiujiang-Ruichang earthquakes of Nov. 26, 2005 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(1): 158-164. (in Chinese)
- [30] Wu J, Yao D D, Meng X F, et al. Spatial-temporal evolutions of early aftershocks following the 2013  $M_w 6.6$  Lushan earthquake in Sichuan, China [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2017, 122: 2873-2889.
- [31] 刘洁, 刘启元, 郭飏, 等. 中国境内天山上地幔小尺度对流与造山作用[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37(6): 728-735.  
Liu J, Liu Q Y, Guo B, et al. 2007. Small-scale upper mantle convection and orogeny of Tianshan Mountains in China [J]. Science China Earth Sciences, 2007, 37(6): 728-735. (in Chinese)
- [32] Avouac J P, Tapponnier P, Bai M, et al. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1993, 98(B4): 6755-6804.
- [33] 沈军, 吴传勇, 李军, 等. 库车坳陷活动构造的基本特征[J]. 地震地质, 2006, 28(3): 269-278.  
Shen J, Wu C Y, Li J, et al. The basic features of the active tectonics in the Kuqa depression of the southern Tianshan [J]. Seismology and Geology, 2006, 28(3): 269-278. (in Chinese)
- [34] 徐杰, 周本刚, 杨晓平, 等. 1949年新疆库车7.4级地震的地震构造条件[J]. 地震地质, 2003, 25(3): 450-459.  
Xu J, Zhou B G, Yang X P, et al. Seismotectonic setting of the 1949 Kuqa, Xinjiang  $M 7.4$  earthquake [J]. Seismology and Geology, 2003, 25(3): 450-459. (in Chinese)
- [35] 汪新文, 陈发景, 李光, 等. 塔北库车坳陷的变形特征及其与油气关系[J]. 石油与天然气地质, 1994, 15(1): 40-50.  
Wang X W, Chen F J, Li G, et al. Deformation characteristics of Kuqa depression North Tarim basin and its relation [J]. Oil and Gas Geology, 1994, 15(1): 40-50. (in Chinese)
- [36] 杨庚, 钱祥麟, 李茂松, 等. 塔里木北缘库车盆地冲断

构造平衡地质剖面研究[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1996, 21(3):295-299.

Yang G, Qian X L, Li M S, et al. Balanced cross-sections of Kuche fold-thrust Belt in Kuche Basin, northern Tarim [J]. Earthquake Science-Journal of China University of Geosciences, 1996, 21(3):295-299. (in Chinese)

[37] He J, Chen Y. Characteristics of stress fields and failure mechanisms of fault intersections[J]. Journal of Structural Geology, 2008, 30(7):977-988.

[38] Scholz C H. The mechanics of earthquakes and faulting[M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2002.

[39] Boulton C E, Young S R. Faulting and fluid flow in the critical zone: Implications for the evolution of the fault network[J]. Tectonics, 2017, 36(5):1077-1093.

[40] 卢华复, 贾东, 陈楚铭, 等. 库车新生代构造性质和变形时间[J]. 地学前缘, 1999, 6(4):215-221.

Lu H F, Jia D, Chen C M, et al. Nature and timing of the KUOA cenozoic structures [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4):215-221. (in Chinese)

[41] 卢华复, 陈楚铭, 刘志宏, 等. 库车再生前陆逆冲带的构造特征与成因[J]. 石油学报, 2000, 21(3):18-24.

Lu H F, Chen C M, Liu Z H, et al. The structural features and origin of the Kuqa rejuvenation foreland thrust belt [J]. Acta Petrol Sinica, 2000, 21(3):18-24. (in Chinese)

[42] 卢华复, 贾承造, 贾东, 等. 库车再生前陆盆地冲断构造楔特征[J]. 高校地质学报, 2001, 7(3):257-271.

Lu H F, Jia C Z, Jia D, et al. Features of the thrust wedge of deformation belt in Kuqa rejuvenation foreland basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(3):257-271. (in Chinese)

[43] 吴传勇, 沈军, 陈建波, 等. 新疆南天山库车坳陷晚第四纪以来地壳缩短速率的初步研究[J]. 地震地质, 2006, 28(2):279-288.

Wu C Y, Shen J, Chen J B, et al. Preliminary study of late quaternary crustal shortening rate along Kuqa depression in South Tianshan, Xinjiang [J]. Seismology and Geology, 2006, 28(2):279-288. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)



(上接第 927 页)

[15] 姬中民, 唐一举, 伍法权, 等. 落石形状和尺寸对恢复系数影响的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(3):8.

Ji Z M, Tang Y J, Wu F Q, et al. Laboratory investigation of the effect of rockfall shape and size on coefficient of restitution[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3):8. (in Chinese)

[16] Mindlin R D, Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces[J]. Journal of Applied Mechanics, 1953, 20(3):327-344.

[17] Bourrier F, Nicot F, Darve F. Physical processes within a 2D granular layer during an impact[J]. Granular Matter, 2008, 10(6):415-437.

[18] Beladjine D, Ammi M, Oger L, et al. Collision process between an incident bead and a three-dimensional granular packing[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2007, 75(6):061305.

[19] Yan P, Zhang J H, Fang Q, et al. Numerical simulation of the effects of falling rock's shape and impact pose on impact force and response of RC slabs[J]. Construction and Building Materials, 2018, 160:497-504.

[20] Calvetti F, Prisco C D, Vecchiotti M. Experimental and numerical study of rock-fall impacts on granular soils[J]. Rivista Italiana di Geotecnica, 2005, 4(4):95-109.

[21] Yuan S, Zhao P, Li L P, et al. A discrete numerical study of the effect of the thickness and the porosity of the sand cushion on the impact response due to the rock-fall[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2022, 130(3):1683-1698.

[22] Calvetti F, di Prisco C. Rockfall impacts on sheltering tunnels: real-scale experiments [J]. Geotechnique, 2012, 62(10):865-876.

[23] 方浩, 张巍, 肖瑞, 等. 砂土颗粒形状的傅里叶描述符自动生成[J]. 高校地质学报, 2018, 24(4):604-612.

Fang H, Zhang W, Xiao R, et al. Automatic fourier-descriptor-based generation of particle shape of sandy soil [J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(4):604-612. (in Chinese)

[24] Mollon G, Zhao J D. Fourier-Voronoi-based generation of realistic samples for discrete modeling of granular materials [J]. Granular Matter, 2012, 14(5):621-638. (in Chinese)