

张杰,王成虎,贾晋,等.基于实测应力数据的北天山区域断层滑动趋势分析[J].地震工程学报,2018,40(1):73-78.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.073

ZHANG Jie, WANG Chenghu, JIA Jin, et al. Fault Slip Tendency in the Western Area of North Tianshan Based on Measured In-situ Stress Data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 73-78. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.073

基于实测应力数据的北天山西部区域 断层滑动趋势分析^①

张杰^{1,2,3}, 王成虎^{1,2}, 贾晋^{1,2}, 徐鑫^{1,2,3}, 刘卓岩^{1,2,3}

(1.中国地震局地壳应力研究所,北京 100085; 2.中国地震局地壳动力学重点实验室,北京 100085;
3.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083)

摘要:通过文献收集与整理,统计了主要由水压致裂法、应力解除法得到的北天山区域的应力数据。引入侧压力系数 k 、应力累积系数 μ_m 和断层摩擦系数 μ ,并根据 Byerlee 准则对计算数据进行分析,结果表明:研究区域应力积累程度较高,区域内整体较稳定,但局部断层滑动趋势风险较大。同时对研究区的地震分布进行统计,发现中西部和中东部区域小震频发,应力易得到释放;同时东北部和西北部小震频率低,推测为应力锁固段,应力积累程度高,若地震易发生强震;综合分析推测研究区断裂带更易沿 NWW-SEE 向滑动。

关键词:北天山; 应力状态; 滑动趋势; 摩擦系数; Byerlee 准则

中图分类号:P548

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2018)01-0073-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.073

Fault Slip Tendency in the Western Area of North Tianshan Based on Measured In-situ Stress Data

ZHANG Jie^{1,2,3}, WANG Chenghu^{1,2}, JIA Jin^{1,2}, XU Xin^{1,2,3}, LIU Zhuoyan^{1,2,3}

(1. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;

2. Key Laboratory of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;

3. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China))

Abstract: The North Tianshan area is one of the most active areas in the Tianshan Seismic Belt. The investigation of crustal stress state in the area can offer important reliable references to determine the activity and slip tendency of regional faults. The stress data in the North Tianshan area were collected with the hydraulic fracturing and stress relief methods. In this study, the lateral pressure coefficient k , stress accumulative coefficient μ_m , and fault friction coefficient μ were introduced and utilized to analyze the collected stress data. According to Byerlee's law, the analysis results indicate that the regional stress accumulation is high; the faults in the study area are stable, while some local faults tend to slip. The statistics of earthquakes distribution in the study area indicate that small earthquakes are more likely to occur in the central-western and central-east-

① 收稿日期:2017-01-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41574088)

作者简介:张杰(1993—),男,在读硕士研究生,从事区域地壳应力及岩石力学研究。Email: zjzhjie@163.com。

通信作者:王成虎,男,研究员,主要从事地应力及地质力学研究。E-mail: huchengwang@163.com。

ern areas where the stress is easy to release, while there are few small earthquakes in the north-eastern and northwestern areas, where are inferred as locked patch of stress and likely to occur strong earthquakes because the stress accumulation is high. In addition, the statistics show that the fault zone in the study area is more likely to slip along a NWW-SEE orientation.

Key words: north Tianshan; stress state; slip tendency; friction coefficient; Byerlee's law

0 引言

天山地区地质构造复杂,主要发育近 EW、NW、NE 向断裂构造。前人对天山地区的活动断层、构造特征做了详细的整理与总结^[1-2]。天山地区的断裂带目前仍处于活动状态,如 1716 年准噶尔西部发生的 7 级大地震,1812 年 3 月 8 日尼勒克东 8 级大地震,1906 年 12 月 23 日玛纳斯 7.7 级大地震,1944 年 3 月 10 日乌苏 7.2 级大地震,2012 年 6 月 30 日新源县 6.6 级地震,2016 年 12 月 8 日呼图壁 6.2 级地震等。区域地壳应力状态的变化是导致断裂、褶皱乃至地震发生的重要原因,研究区域地壳应力状态可以为断层活动性及滑动趋势提供重要的参考依据。

断层的形变及滑动是判断区域地壳稳定性的重要内容之一。通过实测应力数据,可以得到工程区的应力状态;将各工程测点的实测应力数据结合起来,可以得到区域应力状态,结合 Byerlee 准则^[3-4]对断层的滑动稳定性进行分析,可判断断层的滑动趋势。断层滑动的一个重要参数为滑动摩擦系数 μ ,国外的科学家对岩石摩擦系数在实验室^[3]和实际活动断层区域做了深入的研究,并对区域应力状态做了分析^[4-5]。而我国在此方面的研究相对较晚,李方全等^[6]对我国三峡坝区的花岗岩、灰岩和砂岩进行了摩擦试验,得到摩擦系数在 0.65~1.1 之间;郑文卿等^[7]从理论角度分析了断层走向滑动位移与摩擦系数的关系,并以老虎山断层为例印证了断层系数方法的科学性和实用性;宋成科等^[8]通过结合分析断层强度、区域应力状态和断层摩擦系数,将断层浅部和深部应力关系分为两种模式并阐述了震源区断层的摩擦性质;李宏等^[9]在国内首次利用库仑滑动摩擦准则和实测应力数据,对乌鲁木齐西山一碗窑沟断裂带地应力特征和断层活动性进行了调查和研究,系统地评定了活断层地震危险性;张杰等^[10]通过统计天山地区的地应力资料对区域地应力场特征做了分析。天山地区由于特殊的地球动力学环境和复杂的地壳结构,具有高地应力现象,对深埋的地下工程有很大影响。因此本文将近年来在天山地区的工程建设及地震监测中得到的地应力数据资料结合起来,得到区域应力状态,并结合 Byerlee

准则判断断层的稳定性及滑动趋势,以期为工程建设提供参考依据。

1 研究方法

本文引入了侧压力系数 $k_{\max}$ 和 $k_{\min}$,其值分别为最大水平主应力 σ_H 、最小水平主应力 σ_h 与垂直主应力 σ_v 的比值。通过垂直主应力对最大、最小水平主应力进行归一化处理,以此消除测试深度对应力量值的影响。根据侧压力系数,结合 Anderson 理论^[11-12]可以判断断层类型的应力状态^[13],从而更方便地反映出不同测试深度的应力状态。

$$k_{\max} = \sigma_H / \sigma_v \quad (1)$$

$$k_{\min} = \sigma_h / \sigma_v \quad (2)$$

断层的滑动趋势由断层面上的视摩擦系数 μ 所决定。当断层活动时,断层面上的视摩擦系数可以认为是断层摩擦系数^[14],即为断层面上剪应力与正应力的比值。当地层中存在孔隙压力时,摩擦系数 μ 为剪应力与有效正应力之比:

$$\mu = \tau / \sigma_n \text{ 或 } \mu = \tau / \sigma'_n \quad (3)$$

$$\sigma'_n = l^2(\sigma_1 \cdot p_0) + m^2(\sigma_2 \cdot p_0) + n^2(\sigma_3 \cdot p_0) \quad (4)$$

$$\tau = \sqrt{l^2(\sigma_1 - p_0)^2 + m^2(\sigma_2 - p_0)^2 + n^2(\sigma_3 - p_0)^2 - \sigma_n'^2} \quad (5)$$

其中: p_0 为孔隙压力; σ'_n 为有效正应力; l 、 m 、 n 为断层断面法线和应力主轴夹角的余弦值。研究区域内未发现高压含水层,孔隙压力近似取静水压力值。

同时引入应力累积系数 μ_m ,其值为最大剪应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 和平均主应力 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 的比值。Jamison 等^[15]指出断层上由于剪应力增大而产生滑动破坏,即产生破坏的控制因素为法向应力,所以最大剪应力和平均主应力的比值 μ_m 也是地壳破坏、断层滑动的相关参数。Townend 等^[16]认为 μ_m 能够从应力积累的角度反映断层强度, μ_m 值大说明应力积累程度高,当应力积累达到一定程度,将通过断层活动达到释放。本文采用 μ_m 值来分析区域的应力积累水平,为断层滑动趋势分析做参考。

$$\mu_m = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (6)$$

2 原地应力实测数据

本文收集了北天山地区相应工程建设的实测地应力资料,共收集到数据 45 条(表 1、表 2)。测点主要分布于乌苏市、伊宁市等区域(图 1),应力数据由水压致裂法、应力解除法得到。由于深度小于 30 m 的地应力数据易受表层地质构造和风化因素干扰,所以仅采用深度大于 30 m 的应力数据进行分析。

表 2 天山地区地应力实测值及计算结果^[18-19]

Table 2 Measured values of in-situ stress in Tianshan Mountains Region and calculated results^[18-19]

测点	编号	深度/m	σ_H /MPa	σ_h /MPa	σ_v /MPa	μ_m	测点	编号	深度/m	σ_H /MPa	σ_h /MPa	σ_v /MPa	μ_m
新疆精伊霍铁路越岭隧道	JYZ-2	73.26	8.62	6.23	1.96	0.63	新疆精伊霍铁路越岭隧道	JYZ-8	61.17	10.65	8.70	1.64	0.73
		84.76	10.36	8.50	2.28	0.64			81.06	13.85	9.90	2.17	0.73
		93.96	12.50	9.50	2.52	0.66			101.14	17.59	11.50	2.72	0.73
		96.76	11.42	9.20	2.60	0.63			121.93	13.90	10.20	3.28	0.62
		105.84	13.59	9.80	2.84	0.65			141.56	17.06	11.60	3.81	0.63
		137.66	13.15	10.30	3.70	0.56			161.38	18.34	12.30	4.34	0.62
		143.76	13.65	10.60	3.87	0.56			181.95	18.94	12.50	4.90	0.59
		152.68	12.08	9.10	4.11	0.49			200.76	15.68	11.30	5.41	0.49
		178.06	16.52	9.50	4.79	0.55			228.17	17.03	12.30	6.15	0.47
		189.50	17.27	12.20	4.95	0.55			238.16	18.89	13.80	6.42	0.49
	JYZ-7	108.56	11.23	7.50	2.92	0.59	八十一大坂隧洞	ZK204-6	157.50	8.21	5.35	3.86	0.36
		139.16	16.40	9.80	3.74	0.63			162.00	8.25	5.16	3.97	0.35
		164.67	19.67	11.60	4.43	0.63			171.53	8.34	5.01	4.20	0.33
		193.26	13.96	9.20	5.20	0.46			183.00	8.93	5.36	4.48	0.33
		212.90	18.06	10.90	5.73	0.52			185.70	8.05	5.04	4.55	0.28
		221.86	9.70	7.30	5.98	0.24			165.88	8.42	5.22	4.18	0.34
		228.50	8.86	6.40	6.16	0.18			213.00	10.29	6.69	5.33	0.32
		255.96	12.44	9.10	6.90	0.29			216.00	8.12	6.12	5.40	0.20
		308.56	14.20	10.00	8.32	0.26			223.50	8.99	6.59	5.59	0.23
		347.66	17.87	12.20	9.37	0.31			226.00	9.81	6.21	5.65	0.27
		384.50	20.50	14.10	10.37	0.33			237.50	11.92	7.12	5.93	0.34

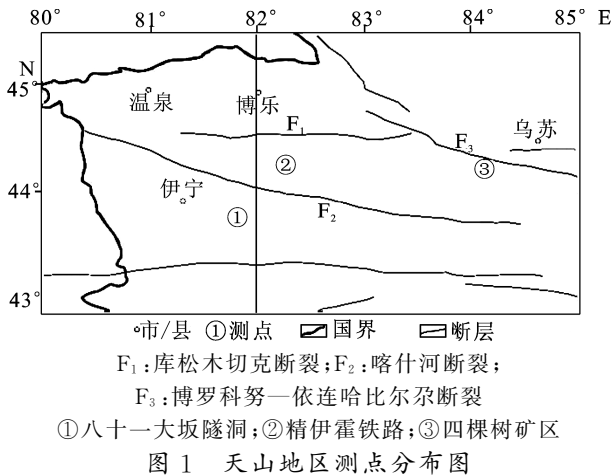


Fig.1 Distribution of measuring points in Tianshan Mountains region

3 应力数据分析

3.1 断层滑动趋势

北天山地区有很多断裂带,在图 1 中只标出了

表 1 天山地区地应力实测值^[17]

Table 1 Measured values of in-situ stress in Tianshan Mountains region^[17]

测点	编号	深度/m	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa	μ_m
乌苏市四棵树矿区	1#	234	13.42	8.64	6.47	0.35
	2#	249	16.33	8.22	6.74	0.42
	3#	266	14.88	8.31	7.37	0.34

重要的一部分。作者曾对新疆天山地区的应力数据进行统计,得到天山地区的最大主应力优势方向为近北北西向^[10]。同时根据侧压力系数随深度的变化^[10],发现当深度达到 300 m 之后,侧压力系数 k 开始趋于稳定,所以取每个测点 300 m 深度的 μ 值进行计算。通过查找测点位置附近断裂和断层的产状,根据式(4)、(5)计算得到断层面的有效正应力和剪应力(表 3),并得到有效应力摩尔圆(图 2)和 300 m 深处的断层摩擦系数(图 3)。

由式(3)计算可知,研究区内 μ 值范围集中在 0.2~0.5 之间,最大值为 0.52,小于 Byerlee 在实验室研究所得的岩石摩擦系数,说明该区域现阶段地应力尚未达到使断层滑动的应力临界值域,表明区域断裂带目前处于相对稳定状态,但个别地点的断层应力摩擦系数较高,接近 0.6,表明局部区域的断层滑动风险较大,即产生地震的可能性较高。

表 3 300 m 深处的侧压力系数 k 及摩擦系数 μ

Table 3 Lateral pressure coefficient k and friction coefficient μ at a depth of 300 m						
测点	钻孔	$k_{\max}$	$k_{\min}$	σ'/MPa	τ/MPa	μ
乌苏市四棵	1#	1.75	1.14	6.60	0.77	0.12
树矿区二号	2#	2.13	1.09	7.99	3.61	0.45
斜井	3#	1.86	1.05	6.43	2.01	0.31
新疆精伊霍	JYZ-2	1.98	1.49	10.72	3.05	0.28
铁路越	JYZ-7	1.98	1.33	9.64	3.18	0.33
岭隧道	JYZ-8	2.37	1.70	18.95	9.91	0.52
八十一大坂	ZK204-6	1.35	0.87	5.81	1.48	0.26
隧洞	ZK204-3	1.33	0.91	6.20	1.19	0.19

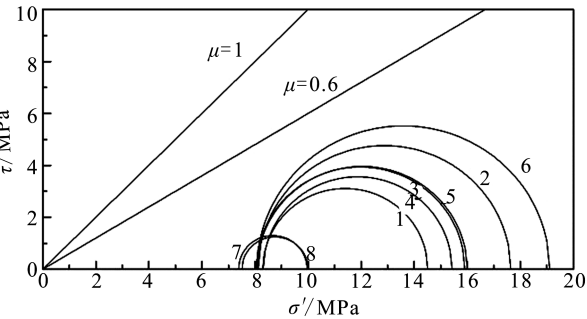


图 2 研究区断层有效应力摩尔圆
Fig.2 The effective stress Mohr circle of faults in study area

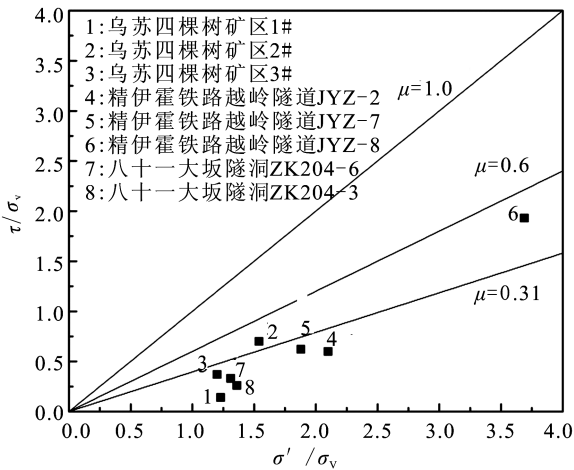


图 3 研究区测孔附近断层摩擦系数
Fig.3 The friction coefficients of faults near the measuring holes

3.2 应力积累程度

为了进一步判断断层可能的滑动趋势,本文对研究区内的应力积累状况进行了分析。 μ_m 是最大剪应力与平均应力的比值,其数值越大,则对应的区域内剪应力越大,这种应力状态越有利于断层活动。 μ_m 的计算需要利用 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 的具体数值,在没有具体数值的情况下可以依据 Anderson 理论,比较 σ_H 、 σ_h 和 σ_v 量值的大小,并近似地将其作为 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 的值,进而进行 μ_m 的计算。

由图 4 可以看出,超过 90% 实测数据得到的

μ_m 值大于 0.2,将所有应力数据进行算术平均,得出 μ_m 平均值为 0.46。其中测点①~③的 μ_m 平均值分别为 0.31、0.53、0.37。根据王成虎等^[14] 的研究, μ_m 的值在 0.5~0.7 之间时地壳应力处于极限状态;当 μ_m 的值接近 0.5 时,说明应力积累水平较高。由于 μ_m 值能够从应力积累的角度反映断层的强度,根据图 5 和应力数据计算得到的 μ_m 值为 0.46~

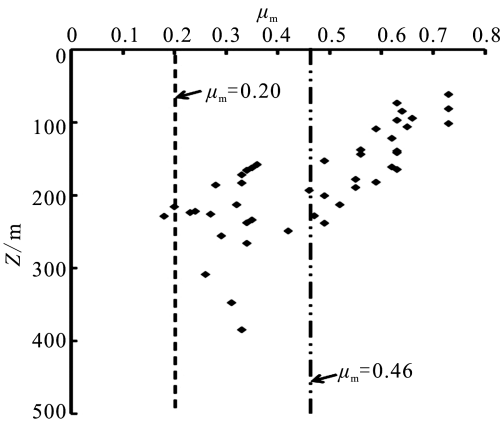


图 4 μ_m 随深度变化图
Fig.4 Plot of μ_m vs. depth

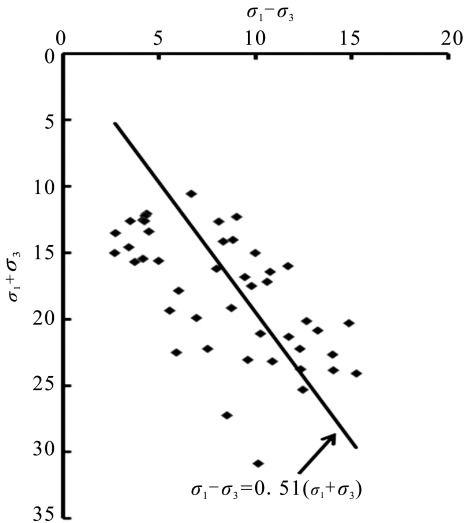


图 5 主应力间关系图
Fig.5 Relationship of principle stresses

0.51,表明研究区域断层具有较高的强度,同时反映了研究区浅层地壳处于摩擦极限状态或亚摩擦极限状态的应力积累水平。

4 研究区地震统计

通过上文分析,研究区具有较高的应力积累,局部地区的断层摩擦系数接近临界值,发生地震的可能性较大。本文统计了自 2000 年以来研究区的地震分布情况(图 6),从图中可以看到,研究区中西部和中东部地区 $M_s<5.0$ 的小震发生频率较高,而 $M_s>5.0$ 的地震发生频率较低。综合上文分析,虽然区域应力积累程度较高,但小震频繁,应力积累易得到释放,不易发生强震;而研究区的东北部及西北部,小震发生频率较低,应力不易得到释放,若地震则可能发生强震。

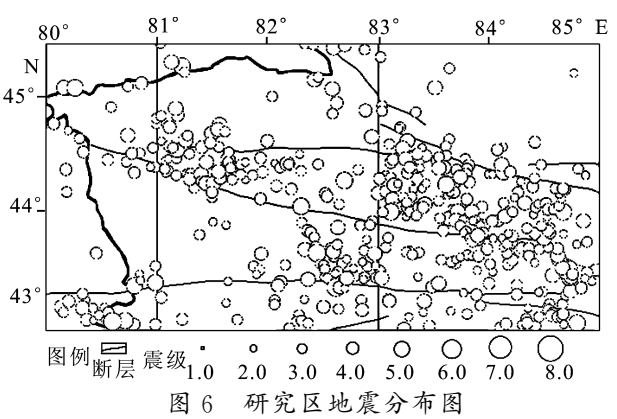


Fig.6 Distribution of earthquakes in study area

本文统计了研究区内自 1990 年以来的 12 条震源机制解(表 4),并绘制了 P 轴和 T 轴玫瑰花图(图 7)。区域内的震源机制解可以反演区域应力场的方向,从图7中可以看出,区域内最大主应力优势方向

表 4 研究区震源机制解结果

Table 4 Focal mechanism solutions of study area

日期	经度/纬度/(°)	深度/km	M_s	节面 1/(°)			节面 2/(°)			T 轴/(°)		P 轴/(°)	
				走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	倾角	方位角	倾角	方位角
1990-10-24	83.99/43.79	15	5.4	224	62	49	106	48	141	54	83	8	342
1995-05-02	84.54/43.49	18	5.5	194	81	34	98	57	170	30	61	16	322
1995-11-01	80.31/42.99	15	5.5	80	77	88	270	13	100	58	347	32	172
2003-12-01	80.50/42.93	15	6.0	69	78	83	281	14	122	56	329	33	165
2004-10-27	80.16/45.14	20	5.5	56	64	44	303	51	146	49	276	8	177
2006-11-23	83.47/44.26	30.4	5.3	96	61	116	231	39	52	64	52	12	168
2007-07-20	82.38/42.93	25.3	5.5	55	86	24	324	66	175	20	282	14	187
2009-01-25	80.92/43.41	27.8	5.3	69	41	77	267	50	102	80	233	4	348
2011-10-16	82.69/44.25	36.5	5.2	102	46	123	238	53	60	66	87	4	349
2011-11-01	82.44/43.55	43.8	6.0	83	62	85	273	28	100	72	340	17	176
2012-06-29	84.76/43.43	28	6.2	37	79	34	300	57	167	31	263	15	164
2012-09-14	82.44/43.74	10	5.0	267	39	96	80	52	85	82	324	7	173

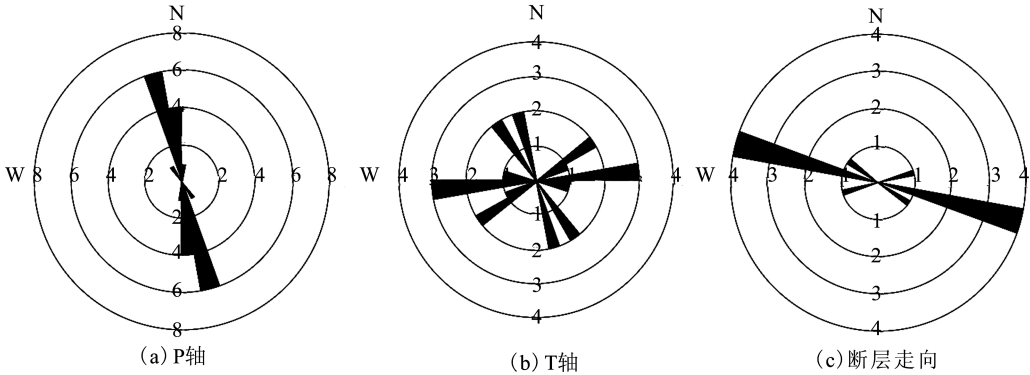


图 7 研究区 P 轴、T 轴、断层走向玫瑰花图

Fig.7 The rose diagram about azimuths of P-axis,T-axis,and the faults in study area

为 NNW,最小主应力方向近 W-E,符合区域应力场特征^[20-21]。同时根据图 6,震中主要沿断裂分布,研究区内有多条断裂,包括库松木切克断裂、喀什河断

裂、恰合普河断裂、博罗科努—依连哈比尔尕断裂等。本文统计了这些断裂走向玫瑰花图,发现其主要集中为 NWW 向,结合区域应力场方向,推测区

域内断裂带易沿 NWW-SEE 方向滑动;同时值得注意的是,地震破裂的同震库伦应力变化可能加速或者延迟其他断层的滑动^[22-23],在未来工作中需要进一步考虑。

5 结论

(1) 根据实测应力数据,计算得到北天山区域断层的摩擦系数 μ ,通过比较计算值与 Byerlee 准则,发现该区域现阶段地应力尚未达到使断层滑动的应力临界值域,表明区域断裂带目前处于相对稳定状态,但个别地点的断层应力摩擦系数较高,接近 0.6,表明局部区域的断层滑动可能性较大,即产生地震的风险较高;

(2) 通过利用 μ_m 系数对北天山地区应力积累程度进行分析,计算得到的数值为 0.46~0.51,表明天山地区断层具有较高的应力积累强度,同时反映了天山地区的浅层地壳处于摩擦极限状态或亚摩擦极限状态的应力积累水平,局部地区断层产生滑动的可能性大。

(3) 对研究区地震分布进行统计,发现研究区中西部和中东部地区小震频发,应力易释放,不易产生大震;东北部和西北部地区小震发生频率较低,应力不易释放,若地震可能会发生强震。同时地震沿断裂分布特征明显,结合研究区内震源机制解和断层走向,推测断裂带沿 NWW-SEE 方向滑动。

参考文献(References)

- [1] 冯先岳.天山的活动断层[J].中国地震,1986,2(2):84-89.
FENG Xianye.The Active Faults in Tianshan Mountains[J].Earthquake Research in China,1986,2(2):84-89.
- [2] 杨章,郭恒祖,丁德轩,等.北天山活断层的初步研究[J].内陆地震,1988,2(3):258-267.
YANG Zhang, GUO Hengzu, DING Dexuan, et al. Preliminary Research of Active Faults for Northern Tianshan Mountain [J]. Inland Earthquake, 1988, 2(3): 258-267.
- [3] BYERLEE J. Friction of Rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116(4): 615-626.
- [4] ZOBACK M D, HEALY J H. Friction, Faulting and In Situ Stress[J]. Annales Geophysicae, 1984, 2(6): 689-698.
- [5] RELEIGH C B, HEALY J H, BREDEHOEFT J D. Faulting and Crustal Stress at Rangely, Colorado[J]. Geophysical Monograph Series, 1972, 16: 275-284.
- [6] 李方全,张伯崇,苏恺之.三峡坝区水库诱发地震研究[M].北京:地震出版社,1993.
LI Fangquan, ZHANG Bochong, SU Kaizhi. Study on Reservoir Induced Earthquake in Sanxia Dam[M]. Beijing: Seismological Press, 1993.
- [7] 郑文卿,陈瑶,袁道阳.断层摩擦系数及其演化定量研究的新途径[J].西北地震学报.2000,22(2):160-166.
ZHENG Wenqing, CHEN Yao, YUAN Daoyang. A New Way of Quantitative Study on the Fault Friction Coefficient and Its Evolution[J]. Northwestern Seismological Journal, 2000, 22(2): 160-166.
- [8] 宋成科,王成虎.区域应力状态与断层强度相关性探究[J].地壳构造与地壳应力文集,2012,24:105-115.
SONG Chengke, WANG Chenghu. Exploration of the Correlation Between Regional Stress State and Fault Strength[J]. Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics, 2012, 24: 105-115.
- [9] 李宏,谢富仁,王海忠,等.乌鲁木齐市断层附近地应力特征与断层活动性[J].地球物理学报,2012,55(11):3690-3698.
LI Hong, XIE Furen, WANG Haizhong, et al. Characteristics of In-situ Stress Measurement near the Fault and Fault Activity in Urumqi City[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3690-3698.
- [10] 张杰,黄禄渊,江英豪,等.新疆天山地区地应力场特征分析[J].工程地质学报,2016,24(增刊1):1370-1377.
ZHANG Jie, HUANG Luyuan, JIANG Yinghao, et al. The Analysis About Characteristics of In-situ Stress Field in Xinjiang Tianshan Area [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(Suppl): 1370-1377.
- [11] ANDERSON E M. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain[M]. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951.
- [12] ZOBACK M D. Reservoir Geomechanics[M]. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [13] 王成虎,丁立丰,李方全,等.川西北跨度 23a 的原地应力实测数据特征及其地壳动力学意义分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(11):2171-2181.
WANG Chenghu, DING Lifeng, LI Fangquan, et al. Characteristics of In-situ Stress Measurement in Northwest Sichuan Basin with Timespan of 23 Years and Its Crustal Dynamics Significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2171-2181.
- [14] 王成虎,宋成科,郭启良,等.利用原地应力实测资料分析芦山地震震前浅部地壳应力积累[J].地球物理学报,2014,57(1):102-114.
WANG Chenghu, SONG Chengke, GUO Qiliang, et al. Stress Build-up in the Shallow Crust Before the Lushan Earthquake Based on the Stress Measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(1): 102-114.
- [15] JAMISON D, COOK N G W. Note on Measured Values for the State of Stress in the Earth's Crust[J]. Journal of Geophysical Research, 1980, 89(B4): 1833-1838.
- [16] TOWNEND J, ZOBACK M D. How Faulting Keeps the Crust Strong[J]. Geology, 2000, 28(5): 399-402.
- [17] 赵善坤,蔡昌宣,刘震,等.北天山矿区地应力分布与区域构造关系研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(增刊1):1599-1603.

[5] 程绍平,邓起东,闵伟,等.黄河晋陕峡谷河流阶地和鄂尔多斯高原第四纪构造运动[J].第四纪研究,1998,18(3):238-248.
CHENG Shaoping,DENG Qidong,MIN Wei,et al.Yellow River and Quaternary Tectonic Movements of the Ordos Plateau [J].Quaternary Sciences,1998,18(3):238-248.

[6] 徐伟,高战武,杨源源.山西峨嵋台地北缘断裂晚第四纪活动性[J].地震地质,2014,36(4):1065-1076.
XU Wei,GAO Zhanwu,YANG Yuanyuan.Later Quaternary Activity Research of the Northern Marginal Fault of Emei Platform,Shanxi Province[J].Seismology and Geology,2014,36(4):1065-1076.

[7] 刘小凤,袁道阳,刘百箴.兰州及邻近地区河流阶地变形特征[J].西北地震学报,2003,25(2):119-124.
LIU Xiaofeng,YUAN Daoyang,LIU Baichi.Study on the Deformation Characteristics of River Terraces in Lanzhou and Adjacent Region [J].Northwestern Seismological Journal,2003,25(2):119-124.

[8] 刘小丰,高红山,刘洪春,等.河流阶地研究进展评述[J].西北地震学报,2011,33(2):195-205.
LIU Xiaofeng,GAO Hongshan,LIU Hongchun,et al.Progress in Research on River Terraces[J].Northwestern Seismological Journal,2011,33(2):195-205.



(上接第 78 页)

ZHAO Shankun,CAI Changxuan,LIU Zhen,et al.Relation-ship Between Regional Geological Tectonic Feature and In-situ Stress Field Distribution in Northern Tianshan Mountain Mining Areas[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2013,9(Suppl):1599-1603.

[18] 马秀敏,彭华,李金锁.新疆西部地应力测量在隧道工程中的应用[J].地质力学学报,2005,11(4):386-393.
MA Xiumin,PENG Hua,LI Jinsuo.Application of Hydraulic Fracturing In-situ Stress Measurements in Tunneling in Western Xinjiang[J].Journal of Geomechanics,2005,11(4):386-393.

[19] 张志国,王显军.北天山西部地应力测量[J].地壳构造与地壳应力文集,2007,19:155-161.
ZHANG Zhiguo,WANG Xianjun.In-situ Stress Measurement in Western North Tianshan[J].Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics,2007,19:155-161.

[20] 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等.中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J].地球物理学报,2004,47(4):654-662.
XIE Furen,CUI Xiaofeng,ZHAO Jiantao,et al.Regional Division of the Recent Tectonic Stress Field in China and Adjacent Areas[J].Chinese Journal of Geophysics,2004,47(4):654-662.

[21] 谢富仁,陈群策,崔效锋,等.中国大陆地壳应力环境基础数据库[J].地球物理学进展,2007,22(1):131-136.
XIE Furen,CHEN Qunce,CUI Xiaofeng,et al.Fundamental Database of Crustal Stress Environment in Continental China [J].Progress In Geophysics,2007,22(1):131-136.

[22] 黄禄渊,张贝,瞿武林,等.2010 智利 Maule 特大地震的同震效应[J].地球物理学报,2017,60(3):972-984.
HUANG Luyuan,ZHANG Bei,QU Wulin,et al.The co-seismic Effects of 2010 Maule Earthquakes[J].Chinese Journal of Geophysics,2017,60(3):972-984.

[23] 黄禄渊,张贝,程惠红,等.2015 年智利 Illapel M_w 8.3 地震同震效应及其对南美大陆地震危险性影响[J].地球物理学报,2017,60(1):163-173.
HUANG Luyuan,ZHANG Bei,CHENG Huihong,et al.The co-seismic Effects of the 2015 Illapel Earthquake and Its Effect on Seismic Risk of South America[J].Chinese Journal of Geophysics,2017,60(1):163-173.