

1977年至2006年新疆伽师地震断层性质 及应力场变化原因初探

屠泓¹, 万秀红¹, 高歌², 罗国富³, 胡永钧⁴, 马震¹

(1. 青海省地震局, 西宁 810001; 2. 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011;

3. 宁夏回族自治区地震局, 银川 750001; 4. 甘肃省地震局, 兰州 730000)

摘要 自1977~2006年, 新疆伽师地区相继发生了多次强地震。本文运用哈佛大学公布的该区域的CMT解, 通过对不同地震的分布及断层性质的定量分析, 将地震分为三个时段, 并由P、T轴拟合了该区域分时段应力场方向, 分析震源性质及区域应力场发现, 1997年3月1日至2003年1月4日该区域的地震断层性质及应力场均发生了较大变化, 而2003年2月24日起, 其地震断层性质和应力场方向又恢复到了第一时段的状态, 结合该区域地层速度模型和区域受力状况、构造背景、以及地震断层性质和分布规律等, 作者提出了该区域地震断层性质及应力场变化原因是由于障碍体的存在结论。

关键词 新疆伽师, 地震断层性质, 应力场, 变化原因, 障碍体

中图分类号 P315

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)04-1038-07

Research of the reason for variations of the earthquake fault characters and the stress field in the Jiashi region of Xingjing from 1977 to 2006

TU Hong-wei¹, WAN Xiu-hong¹, GAO Ge², LUO Guo-fu³, HU Yong-jun⁴, MA Zhen¹

(1. Earthquake Administration of Qinghai, Xining 810001, China;

2. Earthquake Administration of Xinjiang Autonomous Region, Urumqi 830011, China;

3. Earthquake Administration of Ningxia Autonomous Region, Yinchuan 830011, China;

4. Earthquake Administration of Gansu, Lanzhou 730000, China)

Abstract Many times of strong earthquakes occurred in the Jiashi region of Xingjing from 1977 to 2006. The CMT solutions of the region issued by Harvard University are used to analyze the regional stress field and the fault characters of the earthquakes. We divided the earthquakes into three periods, and calculate the stress field direction by P and T axes. Further analysis of the region stress field and the fault character of the earthquakes indicates the variations in the period Mar. 1, 1997 to Jan 4, 2003. Since Feb. 24, 2003, the direction of the basic stress field and the fault character of the earthquakes were recovered. Combining the velocity model of stratum and the stress condition, the fault characters, earthquakes distribution, and tectonic background of the region, we suggest that there is a barrier at the reason for the variation of seismic fault characters and the stress field.

Keywords Xinjiang Jiashi, the fault character of the earthquakes, the stress field, the reason of variation, barrier

0 引言

伽师县的北部和西部地区历来是新疆中强震高发区。该区域周围著名的地震有1895年的喀什库

干7级地震, 1902年阿图什8.2级地震, 1944年喀什西南7级地震, 1955年乌恰两次7级地震为首的震群, 1974年阿克陶西7.3级地震, 1985年乌恰东南7.4级地震之后又发生6.8级地震为首的震群,

收稿日期 2007-10-10; 修回日期 2007-12-20.

基金项目 青海地震科学基金(200698A05)、中国台网中心科研项目(120602-0957-03)和新疆科技攻关项目(200333116)联合资助。

作者简介 屠泓为, 男, 1977年生, 陕西镇安人, 硕士, 目前主要从事地震活动性及测震研究工作。(E-mail: tuhongwei33@sina.com)

1963年3月阿图是以东还发生了6.9级地震等。据记载,自1900年至1996年震区及周围地区共发生256次5级以上的中强地震。伽师县境内一直以来处于6级平静状态,但是最近的一次震群活动却几乎全部发生在伽师县境内,这就是著名的伽师震群,其时间段为1997年1月21日开始至1998年8月,共发生9次6级以上强烈地震,6级地震平静四年之后,于2003年2月24日在这一地区又发生了一次6.8级地震。为什么在这短短的6年时间内,在这一地区的方圆才40公里左右的范围内竟然发生了10余次6级以上强烈地震?这一特殊现象引起了众多学者们的瞩目^[1~16]。赵俊猛等人^[12]认为伽师震群有着特殊的深部构造背景,杨卓欣等人^[13]运用穿过伽师强震群的深地震反射剖面研究了研究区从地表直至莫霍界面的地壳精细结构,认为存在于上地壳上部的两条高倾角的浅部断层可能对应于地质推测的麦盖提-下苏洪断裂带,并与其下方的地壳深断裂构成了伽师强震群可能的深、浅构造关系;乔学军等人^[15]对伽师强震群通过InSAR观测研究认为

该区域及地壳形变主要受到东西向和北东东向断层的影响。

本文通过对该区域及邻近地区1977年以来 $M_w \geq 4.8$ 地震的断层性质的研究发现,结果表明该区域存在着明显的应力场转向和恢复的过程,这个现象曾引起了很多学者的关注^[1~11],周仕勇等人^[5~8]认为震源区域构造应力场与毗邻构造单元的构造应力场存在较大差异,刁桂苓等人^[1]通过聚类分析方法研究了震源区域应力场变化过程。在这个基础上,作者运用前人^[12~14]给出的地层速度结构和构造关系以及不同地震震源机制解性质及分布特征,提出了该区域存在短时期的障碍体^[22]是其应力场阶段性变化的主要原因。

1 资 料

研究区域范围为 $38.5^\circ\text{N} \sim 40.5^\circ\text{N}$, $76.0^\circ\text{E} \sim 78.0^\circ\text{E}$,时间取1977年至2006年,运用哈佛大学给出的矩心矩张量解,共计35个 $M_w \geq 4.8$ 地震,该目录包括伽师系列震群(表1)。

表1 伽师地区1977年以来的地震CMT目录

Table 1 CMT catalogues for the Jiashi seismic region since 1977

序号	时间 年月日时分	纬度 (°)	经度 (°)	深度 (km)	M_w	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴	
						走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位角	倾角	方位角	倾角	方位角	倾角
						(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)
1	197712181647	39.42	77.44	15	5.9	286	27	125	68	68	74	170	21	311	63	74	15
2	198508230833	39.31	76.46	15	5.1	308	85	175	38	85	5	173	0	263	7	83	83
3	198604251612	39.83	77.07	15	5.4	48	45	45	283	60	125	349	8	245	59	83	30
4	199311302037	39.73	76.50	19	5.6	219	74	4	128	87	164	175	9	83	14	297	73
5	199401121022	39.15	76.53	32	5.5	298	60	151	44	65	34	170	3	262	41	76	49
6	199603191500	39.93	76.80	22	6.3	273	26	109	72	66	81	169	20	325	86	75	8
7	199611230159	39.00	76.83	33	5.0	345	19	117	136	73	81	234	27	33	61	139	9
8	199701210148	39.51	77.26	33	5.9	315	75	-177	224	87	-15	179	13	271	8	34	75
9	199701290820	38.97	77.42	33	5.2	42	43	10	304	83	132	3	26	251	37	118	42
10	199703010604	39.40	76.89	22	5.6	180	80	-173	86	83	-10	44	12	135	2	233	78
11	199704052346	39.41	76.93	33	5.9	161	78	179	251	89	12	26	7	117	9	257	78
12	199794060436	39.52	77.03	15	6.0	253	43	-36	10	67	-27	235	53	126	14	27	34
13	199704061258	39.48	76.99	33	5.3	227	36	-61	12	59	-109	241	69	116	12	23	17
14	199704110534	39.61	76.93	15	6.2	240	37	-45	9	65	-118	237	60	119	15	22	25
15	199704122109	39.64	77.02	16	5.3	243	48	-65	28	48	-115	226	71	136	0	46	19
16	199704151819	39.69	76.99	23	5.8	170	66	-162	73	74	-25	30	29	123	5	222	60
17	199706240924	39.80	77.18	34	5.1	345	72	-167	251	78	-18	207	22	299	4	39	68
18	199710171735	39.59	77.07	33	5.4	339	81	178	70	88	9	204	5	295	8	81	81
19	199803191351	39.94	76.88	33	5.6	243	23	79	75	68	95	162	22	354	67	253	4
20	199808020440	39.67	77.13	15	5.6	231	30	-56	13	66	-108	252	65	116	19	20	16
21	199808270903	39.51	77.22	32	6.4	240	78	0	330	90	-168	195	8	104	8	331	78
22	199809030643	39.47	77.30	32	5.0	234	32	-90	54	58	-90	324	77	144	13	54	0
23	200301041107	39.72	77.11	33	5.2	341	71	-162	245	73	-20	203	26	293	1	26	64
24	200302240203	39.37	77.24	24	6.3	239	33	62	92	61	107	169	15	37	69	263	15
25	200302242118	39.35	77.04	15	5.2	289	33	126	69	64	69	174	16	302	65	78	19
26	200302250352	39.52	77.62	15	5.4	110	77	166	203	77	14	337	0	67	19	247	71
27	200303120447	39.29	77.32	15	5.7	245	33	73	85	58	101	167	13	24	74	259	9
28	200303152259	39.74	77.47	15	5.1	330	57	178	61	89	33	190	22	290	24	63	57
29	200303302315	39.02	77.46	42	5.3	273	34	89	93	56	90	183	11	5	79	273	0
30	200305041544	38.86	77.39	15	5.8	308	53	-179	218	89	-37	166	26	269	24	36	53
31	200306041628	39.66	77.69	15	5.2	90	36	87	274	54	92	3	9	195	80	93	2
32	200309262335	40.20	77.05	15	5.4	290	13	58	143	79	97	227	34	62	55	322	7
33	200410071614	40.38	77.51	16.9	4.8	245	14	72	83	77	94	170	32	359	58	262	4
34	200503240738	39.81	77.99	30.7	4.8	187	35	32	70	73	120	137	22	16	53	240	29
35	200606081134	40.53	77.64	30.2	4.9	290	35	113	82	58	74	183	12	313	72	90	13

2 震源机制解分析

刁桂苓等^[1]曾用聚类方法对不同时段的地震进行了划分,本文中运用震源机制解对不同时间段的地震断层性质进行了分析,将伽师震区自 1977 年以来 $M_w \geq 4.8$ 的地震的震源机制解按其性质划分为三个时段(图 1):第一个时段为 1977. 12. 18~1997. 01. 29.(图 1a),地震主要分布在伽师震群的周围,形成地震空区状分布,以逆冲断层和走滑断层性质的地震为主.第二个时段 1997. 03. 01~2003. 01. 04.(图 1b),地震以正断层和走滑断层为主,仅在该震群的北边发生了一次含倾滑性质的逆断层.第三个时段 2003. 02. 24~2006. 06. 08.(图 1c),其发震地点分别向南向北偏移,以逆断层和走滑断层为主.

根据图 1 的(a)、(b)、(c)的震源机制解性质及地震分布,可以明显的看出第一时段(图1a)的地震

断层性质为逆断层和走滑断层为主之外,还可以看出这些地震形成了一个很小的空区,在接下来的第二时段在这个空区分阶段发生了一系列以正断层及逆断层性质为主的地震,参考图 1,图 2,我们不禁要问,是什么作用使得在如此小的一个区域内地震性质发生了这么大的变化? 作者认为,由于该区域受的主压力方向为近北北东向,在第一阶段后期在空区的南部(图 1a)形成了一个短时期的障碍物,在短时期内阻挡了南面传向障碍物北边附近的力,由于障碍物比较小,部分力可以通过障碍物周围的岩石传向北部,这样一来在障碍物北部附近区域就形成了宜发生正断层及走滑断层的区域,第三个阶段即随着 2003 年 2 月 24 日 $M_s 6.8$ 地震的发生,标志着这个障碍物的解体,于是整个小区域的受力又变为近乎均匀,所以发生的地震的断层性质又以逆断层和走滑断层为主.

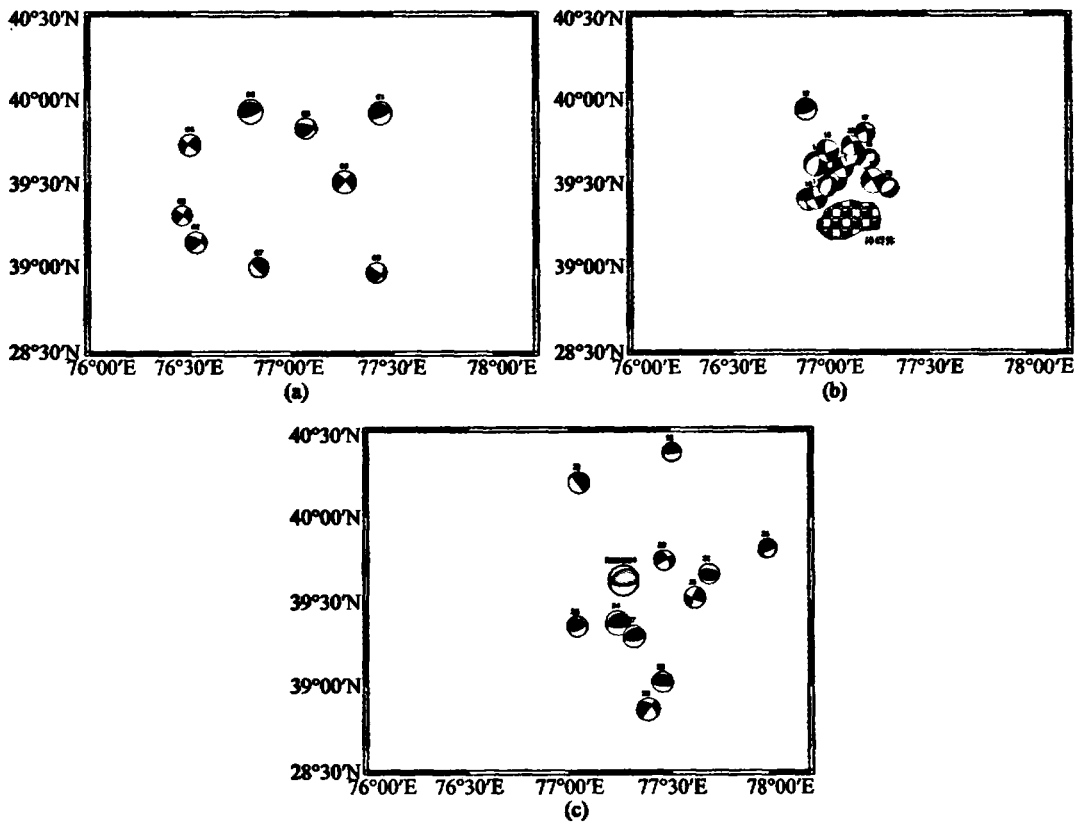


图 1 分时段地震断层性质及震源机制解分布图

(a) 1977. 12. 18~1997. 01. 29; (b) 1997. 03. 01~2003. 01. 04; (c) 2003. 02. 24~2006. 06. 08.

Fig. 1 Characters of the earthquake faults and the focal mechanism solution distribution

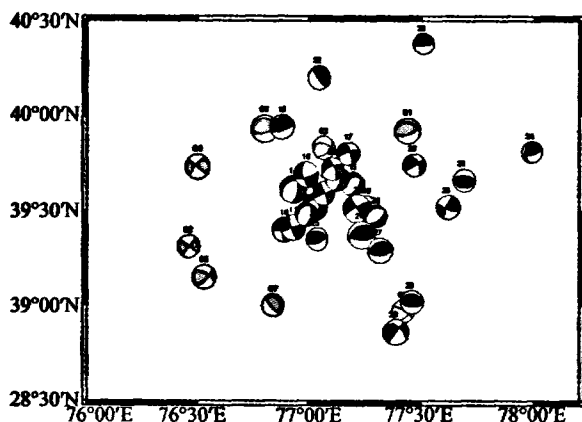
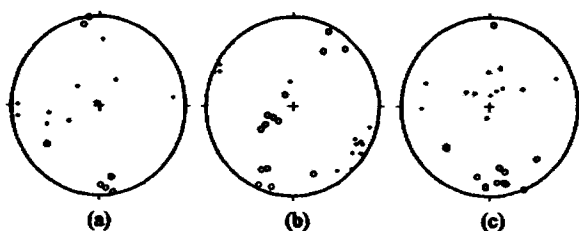


图2 1977.12.18.~2006.06.08.震源机制解分布图

Fig. 2 Distribution of focal mechanism solutions

3 震源区应力场阶段性变化分析

Angelier, Ellsworth 等人^[34,35]先后提出了反演应力场的方法,本文为了去除局部介质的不均匀性,在前人的理论基础上^[16~21]运用了同一区域多个地震的震源机制解作为反演资料,将其主压应力轴和主张应力轴加以计算,根据对这 35 次地震的 P, T 轴散点图分析(见图 3),也可以将应力场变化分为上述三个阶段,把同一时段地震的主压应力轴和主张应力轴分别取其平均值作为该时段的基本应力场方向,计算得出:第一阶段 P 轴方位角为 361.6° , T 轴方位角为 267° ;

图3 1977年至2006年 $M_s \geq 4.8$ 地震的应力场转向和

恢复的过程散点图(注:·表示 T 轴,○表示 P 轴)

(a)1977.12.18~1997.01.29, (b)1997.03.01~2003.01.04;

(c)2003.02.24~2006.06.08

Fig. 3 Scattered points of the stress field variations and recovery process of $M_s \geq 4.8$ from 1977 to 2006

第二阶段 P 轴方位角转化为 35.5° , T 轴方位角转化为 305.5° ;第三阶段 P 轴方位角变为 357.2° , T 轴方位角变为 251.6° 。可以看出在第二个阶段明显偏离了第一个阶段的应力场方向,第三个时段的应力场基本又恢复到了第一个时段的方向。

一般认为构造应力场的方向是比较稳定的,而区域应力场有时候受区域深大断层或交叉断层的影响,使得受力不均匀,进而在局部形成障碍体,而使小区域的应力场发生阶段性改变。通过对地震活动分布图及断层构造图分析,认为在伽师震区南部很容易形成障碍体。如果推断正确,由于障碍体的存在,伽师区域应力场的变化的原因也就迎刃而解了。

4 对假设的论证及探讨

近年来,随着科技的发展,使得很多学者有条件做地下介质结构及应力场等方面的研究^[10~33],为解释和分析地震现象作出了重大贡献。地壳速度及障碍体就是解释特殊地震现象的观点之一。

蒋海昆等^[22]研究的结果表明:由于标本预置断层两盘与障碍体之间、以及断层两盘彼此之间复杂的相互作用,使得交替活动成为含障碍体平直断层标本变形过程中最为显著的特征;含障碍体平直断层标本能够发生动力学失稳的前提条件是障碍体在外加载荷作用下首先发生破坏,微破裂群体在障碍体破坏前后显示不同的时空演化特征。

焦明若等的^[23]研究结果表明,无论在贯通的断层上或没有贯通的断层上,障碍体两个端点上的应变积累均较高。但从障碍体上的应变积累量来看,贯通的断层上障碍体上的应变积累量明显高于未贯通断层上的障碍体积累量。

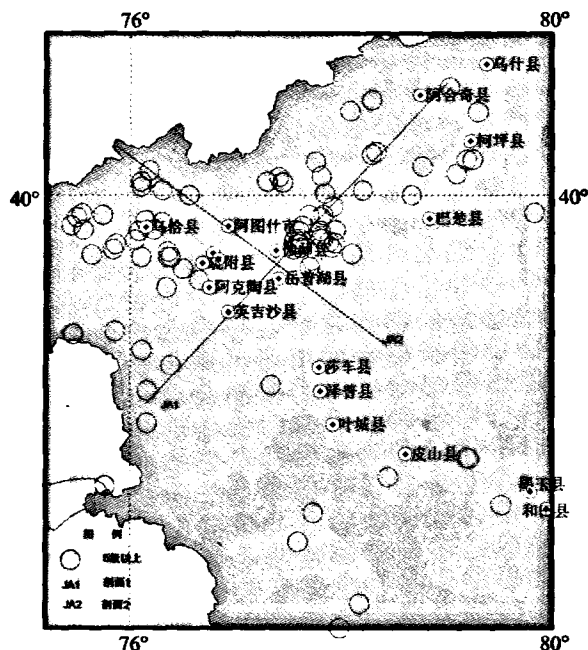
图4 剖面位置与地震活动分布图^[14]

Fig. 4 Profile location and seismic activity distribution

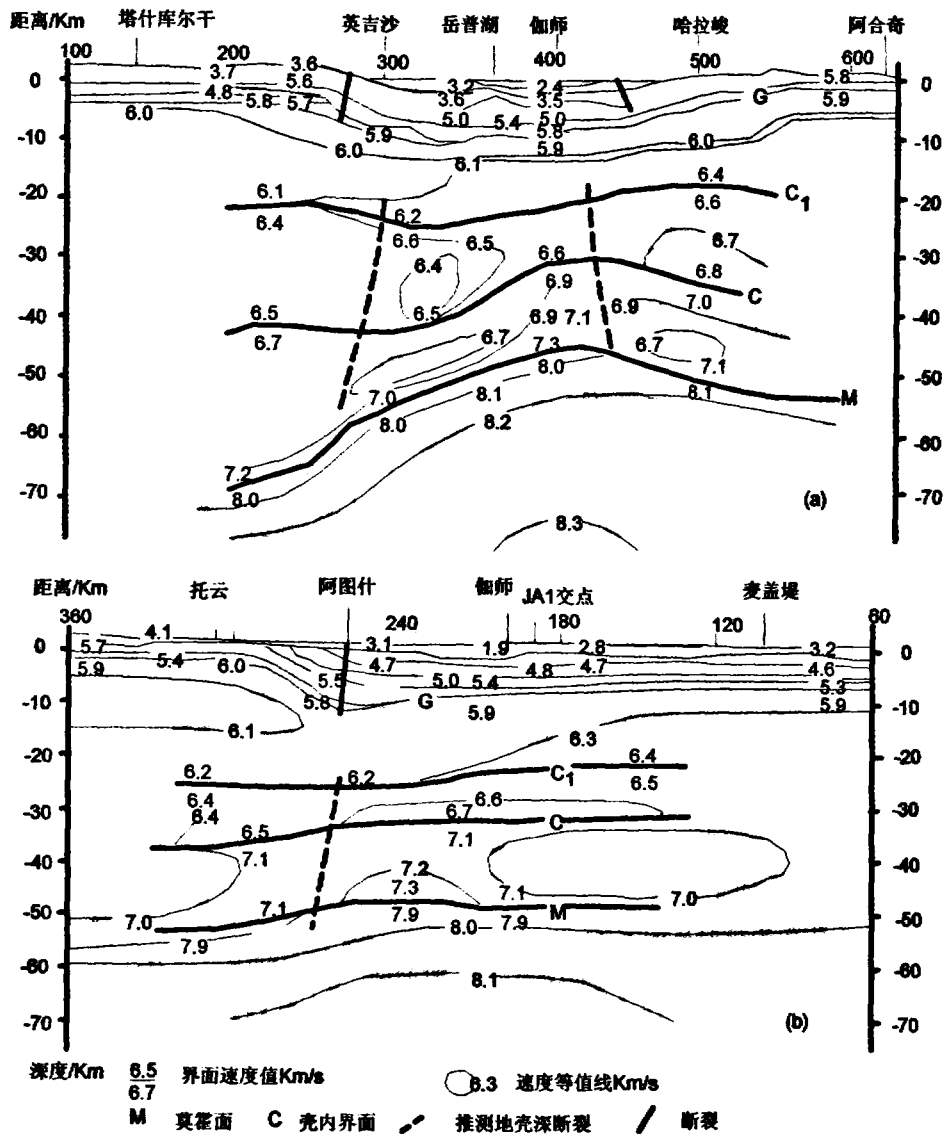
图 5 剖面壳幔二维速度结构与构造图^[14]

Fig. 5 2-D velocity structure and the crust-mantle profile

中国地震局地球物理勘探中心赵金仁、张先康等^[14]于1998年在国家科技部、中国地震局的联合主持下,在塔里木西北缘地区分别沿塔石库尔干-伽师-阿合奇方向和麦盖堤-阿图什-托云方向做出的地壳深部构造背景的研究结果(见图4,图5)。

通过对地震活动分布图及剖面壳幔速度与构造图分析,可以看出伽师区域的地层速度在20~50 Km深度处有明显的变化,这说明了地下介质有很大的差异,表明了该区域的地层岩体与周边有着明显的不同,故其岩体与底层的附着力度

与周围的不同,进而使得其对挤压力的反应与周边的岩石存在着不同。在一定的时间段内可以认为这个巨型岩体为障碍体。同时可以看出伽师区域

南北不仅地表有两条断裂,而且其地下20~60 km处也有两条推测地壳深断裂,这与赵俊猛、杨卓欣、乔学军等人^[12~15]在该区域构造研究结论是一致的。所以可以说研究区中存在特殊的构造环境和与周围速度结构不同的巨型岩体,为短时期障碍体的形成提供了优势条件,也为本文的观点提供了依据。

5 结论及讨论

(1)分析哈佛大学公布出的新疆西南区域CMT解资料,可得出该区域存在稳定的背景应力场,其应力方向为:最大压应力P轴方向近于SN,最小压应力T轴方向近于EW。

(2)通过对震源机制解对应力方向计算和断层

性质的研究,可将1977年至2006年为三个阶段即(a)1977.12.18~1997.01.29,应力场方向与背景应力场一致,断层性质主要以逆断层和走滑断层为主;(b)1997.03.01~2003.01.04,主压应力场方向变为SSW-NNE,主张应力场方向变为ES-NW,断层性质主要以正断层和走滑断层为主;(c)2003.02.24~2006.06.08,应力场方向又恢复为与背景应力场基本一致,断层性质又恢复为以逆断层和走滑断层为主。

(3)根据对地层速度模型、深大断裂的分布情况和应力场及地震断层性质变化的研究,分析认为在第一阶段后期在该区域形成了一个短时期的障碍体,使得在第二个阶段的地震断层性质及应力场发生了较大变化。

(4)当局部应力积累到能推翻障碍体能量时,于是在障碍体的北部发生了2003年2月24日以逆断层性质为主的6.8级地震,标志着这个障碍体的瓦解,而全区域受力又变为近于均匀。

(5)研究认为一旦在一个区域内形成障碍体,将会在一定时间段内使得障碍体的受压力方向的另一面的压力减弱,从而形成与原来不同性质的地震,当障碍体瓦解时将会发生较大的地震。这一规律符合力学原理,并在伽师区域得到了很好的验证。

致 谢 在与王海涛研究员的多次讨论中,使得第一作者深受启发,赵翠萍博士也给提供了许多宝贵意见,在此一并致以衷心的感谢。

参 考 文 献 (References):

- [1] 刁桂苓,王海涛,高国英,龙海英,聂晓红.伽师强震系列应力场的转向过程[J].地球物理学报,2005,48(5):1062~1068.
Diao G L, Wang H T, Gao G Y, Long H Y, Nie X H. A deflection process for the stress field of the Jiashi strong earthquake sequence[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(5): 1062~1068.
- [2] 吕桂林,韩京,陈培善.新疆南天山环境应力场特征[J].内陆地震,1997,11(3):212~217.
Lu G L, Han J, Chen P S. Characteristics of the Environmental stress field in south Tianshan of Xinjiang[J]. Inland Earthquake, 1997, 11(3): 212~217.
- [3] 高国英,王海涛,等.帕米尔东北侧中强地震前应力场动态变化特征分析[J].西北地震学报,2001,23(4):176~184.
Gao G Y, Wang H T, et al. Analysis on the dynamic change character of the stress field before mid-strong earthquakes in northeastern Pamir[J]. Northwestern Seismological Journal, 2001, 23(4): 176~184.
- [4] 赵翠萍,夏爱国.新疆巴楚-伽师6.8级地震序列震源特征的初步研究[J].内陆地震,2003,17(2):182~189.
Zhao C P, Xia A G. Primary study on the source feature of Bachu-Jiashi M_s6.8 earthquake series[J]. Inland Earthquake, 2003, 17(2): 182~189.
- [5] 周仕勇.1997年伽师强震群研究及其生成机理的探索[J].国际地学动态,2000,34~35.
Zhou S Y. The research of Jiashi strong earthquake swarm and its form mechanism[J]. Recent Developments in World Seismology, 2000, 34~35.
- [6] 周仕勇,许忠淮,陈晓非.1997年伽师强震群生成机理研究[J].自然科学进展,19(2):999~1004.
Zhou S Y, Xu Z H, Chen X F. The research of form mechanism of Jiashi strong earthquake swarm[J]. Progress in Natural Science, 19(2): 999~1004.
- [7] 周仕勇,许忠淮,陈晓非.伽师强震群震源特征及震源机制力学成因分析[J].地球物理学报,2001,44(5):654~662.
Zhou S Y, Xu Z H, Chen X F. Analysis on the source characteristic of the 1997 Jiashi swarm western China[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2001, 44(5): 654~662.
- [8] 周仕勇,姜明明, Russell Robinson. 1997年新疆伽师强震群发展过程中发展断层间相互作用的影响[J].地球物理学报,2006,49(4):1102~1109.
Zhou S Y, Jiang M M, Russell R. The role of fault interactions in the generation of the 1997 Jiashi strong earthquake swarm, Xinjiang, China[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(4): 1102~1109.
- [9] 赵翠萍,顾瑾平,白彤震.新疆伽师强震群震源应力环境分析[J].中国地震,2001,16(3):289~298.
Zhao C P, Gu J P, Bai T X. The analysis of focal stress environment of Jiashi strong earthquake swarms in Xinjiang[J]. Earthquake Research In China, 2001, 16(3): 289~298.
- [10] 屠泓为.新疆伽师地区中小地震矩张量反演应用研究[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所,2006,1~66.
Tu H W. The application of Xinjiang Jiashi region's middle and small earthquake moment tensors inversion [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology in China, 2006, 1~66.
- [11] 王海涛,王琼,赵翠萍.2003年2月24日新疆巴楚-伽师Ms6.8级地震的应力触发研究[J].西北地震学报,2006,28(4):335~340.
Wang H T, Wang Q, Zhao C P. Research on stress triggering of bachu-Jiashi M_s6.8 earthquake on Feb. 24, 2003, in Xinjiang[J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(4): 335~340.
- [12] 赵俊猛,卢芳,嘉世旭,等.伽师强震群的深部动力学条件[J].地震研究,2006,29(4):338~343.
Zhao J M, Lu F, Jia S X, et al. Deep geodynamic conditions for the Jiashi strong earthquake swarms[J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(4): 338~343.
- [13] 杨卓欣,张先康,嘉世旭,等.伽师强震群震源精细结构的深地震反射探测研究[J].地球物理学报,2006,49(6):1701~1708.
Yang Z X, Zhang X K, Jia S X, et al. Fine crustal structure in the Jiashi earthquake swarm region revealed by deep seismic reflection profiling[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(6): 1701~1708.
- [14] 赵金仁,张先康,张成科,等.伽师-阿图什震区地壳深部结构特征的探测与研究[J].中国地震,2002,18(2):317~325.
Zhao J R, Zhang X K, Zhang C K, et al. The detection and re-

- search of the deep crust tectonic characters at the Jiashi-Artux seismic region[J]. *Earthquake Research In China*, 2002, 18(2):317~325.
- [15] 乔学军,郭利民. 新疆伽师强震群区的 InSAR 观测研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2006, 27(1):7~12.
Qiao X J, Guo L M. Study on Jiashi strong earthquake swarm area by InSAR[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2006, 27(1):7~12.
- [16] 崔效峰. 伽师及周围地区现代构造应力场特征研究[J]. *地震学报*, 2006, 28(4):347~356.
Cui X F. Characteristics of recent tectonic stress field in Jiashi, Xinjiang and adjacent regions[J]. *Acta Seismologica Sinica(in chinese)*, 2006, 28(4):347~356.
- [17] 梁海华,侯建军,刘树文,等. 中国构造应力场与强震复发周期关系的数值模拟[J]. *地震地质*, 1999, 21(1): 51~57.
Liang H H, Hou J J, Liu S W, *et al.* Tectonic stress field and Large earthquake recurrence period in China[J]. *Seismology and Geology*, 1999, 21(1): 51~57.
- [18] 马瑾,刘力强,马胜利,等. 复杂构造应力场扰动场与发震构造识别问题的研究[J]. *地震地质*, 1995, 17(4):372~382.
Ma J, Liu L Q, Ma S L, *et al.* A discysson on the disturbant stress field in complex fault system and identification of seismogenic fault[J]. *Seismology and Geology*, 1995, 17(4):372~382.
- [19] 刁桂苓,于利民,李钦祖. 强震前后震源区应力场变化一例[J]. *地震学报*, 1994, 16(1):64~69.
Diao G L, Yu L M, Li Q Z. A case of field stress change before and after strong earthquake in the epicenter region[J]. *Acta Seismologica Sinica(in chinese)*, 1994, 16(1):64~69.
- [20] 陆明勇,郑文衡. 地壳块体应力变化特征及其与地震关系的初步研究[J]. *地震学报*, 2005, 27(3):282~291.
Lu M Y, Zheng W H. Preliminary study on variation characteristics of ocean tide dynamic stress in crust and its relationship with earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica(in chinese)*, 2005, 27(3):282~291.
- [21] 高建理. 地壳动态应力场[J]. *地壳构造与地壳应力*, 1994, 5: 1~15.
Gao J L. Dynamic field stress in the earth's crust[J]. *Tectonic and Stress of Crust*, 1994, 5:1~15.
- [22] 蒋海昆,马胜利,张流,等. 含障碍体平直断层标本变形过程中群体破裂事件的时空演化特征[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(2): 209~216.
Jiang H K, Ma S L, Zhang L, *et al.* Spatial-temporal characteristics of acoustic emission of rock sample with regular fault and a columnar barrier during deformation[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2003, 46(2): 209~216.
- [23] 熊明若,张国民,马胜利,等. 含障碍体滑动方向相同平行断层失稳破坏应变场、声发射分布特征的研究[J]. *地震学报*, 2002, 24(4):357~365.
Jiao M R, Zhang G M, Ma S L, Ma H S. Study on the characteristics of rock failure strain and acoustic emission field for two parallelling faults with the same slip direction including asperities[J]. *Acta Seismologica Sinica(in chinese)*, 2002, 24(4):357~365.
- [24] 万战生,赵国泽,陈小斌,等. 岩石圈地震前兆异常机制[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(3):708~714.
Wan Z S, Zhao G Z, Chen X B, *et al.* Mechanism of the lithosphere earthquake precursor anomalous phenomena[J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2007, 22(3):708~714.
- [25] 王童奎,李瑞华,李小凡,等. 横向各向同性介质中地震波场谱元法数值模拟[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(3):778~784.
Wang T K, Li R H, Li X F, *et al.* Numerical spectral-element modeling for seismic wave propagation in transversely isotropic medium[J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2007, 22(3):778~784.
- [26] 郑文衡,陆明勇. 地震动态触发机制的初步研究[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 115~122.
Zheng W H, Lu M Y. A preliminary study on mechanism of dynamic triggering of earthquakes[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2005, 48(1): 115~122.
- [27] 张国民,马宏生,王辉,等. 中国大陆活动地块边界带与强震活动[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 602~610.
Zhang G M, Ma H S, Wang H, *et al.* Boundaries between active-tectonic blocks and strong earthquakes in the China mainland[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2005, 48(3): 602~610.
- [28] 彭艳菊,黄忠贤,苏伟,等. 中国大陆及邻区海域地壳上地幔各向异性研究[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(3): 751~759.
Peng Y J, Huang Z X, Su W, Zheng Y J. Anisotropy in crust and upper mantle beneath China continent and its adjacent seas[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2007, 50(3): 752~759.
- [29] 刘永霞,徐春明,宁俊瑞. 不同模式自组织介质中声波传播特性的比较研究[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(3): 830~836.
Liu Y X, Xu C M, Ning J R. Comparison of acoustic propagation in several different types self-organized media[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2007, 50(3):830~836.
- [30] 王兆磊,周辉,李国发. 用地质雷达数据资料反演二维地下介质的方法[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(3): 897~904.
Wang Z L, Zhou H, Li G F. Inversion of ground-penetrating radar data for 2D electric parameters[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2007, 50(3):897~904.
- [31] 曹忠权,张智,田小波. 青藏高原班公湖-怒江缝合带域岩石密度结构及意义[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 523~528.
Cao Z Q, Zhang Z, Tian X B. Rock density structure in Bangong-Nujiang suture zone and its significance[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2007, 50(2):523~528.
- [32] 郝重涛,姚陈. 任意空间取向 TI 介质中体波速度特征[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 546~555.
Hao C T, Yao C. Analysis of body-wave velocity characteristic for TI medium with arbitrary spatial orientation[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2007, 50(2):546~555.
- [33] 吴子泉,尹成. 电阻率横向剖面法及其在隐伏断层探测中的应用研究[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 625~631.
Wu Z Q, Yin C. Application of Schlumberger transverse profiling method to detecting buried faults[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2007, 50(2):625~631.
- [34] Angelier J. Determination of the mean principal directions of stresses for a given population[J]. *Tectonophysics*, 1979, 56: 17~26.
- [35] Eshworth W L. A general theory for determining the state of stress in the earth from fault slip measurements[J]. *Terrra Cognita*, 1981, 2(2):170~171.