

塔里木盆地主要断裂的地球物理特征 及与天然地震的关系

朱传庆^{1,2}, 杨书江³, 李同彬³, 史丽艳⁴

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 东方地球物理公司, 涿州 072751; 4. 北京市地震局, 北京 100080)

摘要 新疆塔里木盆地是中国最大的内陆盆地,地质构造上是周围被许多深大断裂所限制的稳定地块,塔里木盆地的地震发生是盆地与造山带耦合俯冲的结果,与盆地周缘的活动性深大断裂相关,是盆地扩张使盆地与山脉的结合带不断受到挤压产生脆性破裂引起的,构成盆地中部为稳定区、而盆地周围山脉为地震频繁区的格局.塔里木盆地的活动断裂主要发育于山体与盆地的过渡地带,而近两年这 6 次规模比较大的地震也都发生在西昆仑和南天山的山前俯冲带,据以往统计资料,塔里木盆地内所有地震数据中的 85% 是分布在塔西南和西南天山的南缘区域.本文通过分析认为,塔里木盆地地震的发生与大型的断裂构造相关.断裂构造在重力、磁力等地球物理场上特征明显,深部结构又容易被大地电磁测深、地震测深等物探方法揭示.通过综合地球物理方法,可以有效地研究断裂的平面展布特征及深部结构,对于研究天然地震带的展布和地震发生机制,具有一定的意义.

关键词 塔里木盆地,断裂,地球物理,地震

中图分类号 P315,P541

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)06-1685-07

Geophysical characters of major faults in the Tarim Basin and the relationships with earthquakes

ZHU Chuan-qing^{1,2}, YANG Shu-jiang³, LI Tong-bin³, SHI Li-yan⁴

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. BGP, CNPC, Zhuozhou 072751, China; 4. Beijing Earthquake Administration, Beijing 100080, China)

Abstract The Tarim Basin, the largest inland basin in China, is a stable block that is restricted by many deep faults around it. Earthquakes in the Tarim Basin have correlativity with the deep active faults, are the results of basin's expansion. A basin with mountains has combined with brittle fractures caused by squeezing; pose to stability in the middle of the basin, and earthquake-prone zones around the mountains. The major active faults in the Tarim basin developed close to the mountains, and the earthquakes of six times in the past two years have occurred in the West Kunlun subduction zone. According to previous statistics, 85% of all seismic data in the Tarim Basin is located in the southwest Tianshan. Cenozoic tectonics is easy to be recognized in gravity and magnetic fields. And the deep structures are also easy to reveal by magnetotelluric exploration, seismic exploration and other geophysical methods. Based on the geophysical data analysis, the seismogenic tectonics in the Tarim Basin and their characteristics are expatiated in this article. There are clear differences in tectonics between the east and west in the basin, and earthquakes occurred in the western region, for which the interpretation can be obtained from the geophysical data.

Keywords Tarim Basin, faults, geophysics, earthquake

收稿日期 2008-07-10; 修回日期 2008-08-20.

基金项目 国家自然科学基金项目(40672197)资助.

作者简介 朱传庆,男,1981年生,博士研究生,构造地质学专业.(E-mail:zqc_igcas@163.com)

0 引言

新疆塔里木盆地是中国最大的内陆盆地,面积约40多万 km²,南北最宽处520 km,东西最宽处1400 km.塔里木盆地是大型封闭性山间盆地,位于天山山脉和昆仑山脉之间,盆地呈不规则菱形,四周为高山围绕,地质构造上是周围被许多深大断裂所限制的稳定地块.从理论上讲,盆地内发生地震的几率较小.

地震是新构造运动的表现形式之一,地震发生的地点、强度与地壳最新构造变动样式有着密切的联系^[1].近年来邵辉成、刘华峰等(2006)应用最优化模型建立了断层与地震的相互关系模型:总体上距活断层越近,地震发生的概率值越高^[2].表明活断层与地震的关系较为明确.

塔里木盆地周围的山体强烈隆起,活动断裂主要发育于山体与盆地的过渡地带.新生代的构造运动具有明显的继承性,现今构造运动强烈^[3],并有基

性岩浆活动,证明与地震关系密切.新生代构造与地貌有比较好的吻合关系,断裂带地表坡度陡,重力梯度值大,重力、磁力等地球物理场上特征明显.而因其规模较大,变形强烈,所以深部结构又容易被大地电磁测深、地震测深等物探方法揭示.因此,本文通过对地球物理资料的分析,探讨塔里木盆地与天然地震相关的主要大型断裂的地球物理特征.

1 塔里木盆地的主要断裂及与天然地震的关系

1.1 塔里木盆地的主要断裂

塔里木盆地的基本构造特征为三隆五坳及周缘的四个断隆(图1),分别是塔北隆起、中央隆起、塔南隆起、库车坳陷、北部坳陷、东南坳陷、西南坳陷、塘古孜巴斯坳陷及库鲁克塔格断隆、柯坪断隆、铁克里克断隆和阿尔金断隆.盆地内部的三个隆起和五个坳陷又可化分出若干二级构造单元,塔里木盆地各级构造单元之间的边界以断裂为主^[4,5].

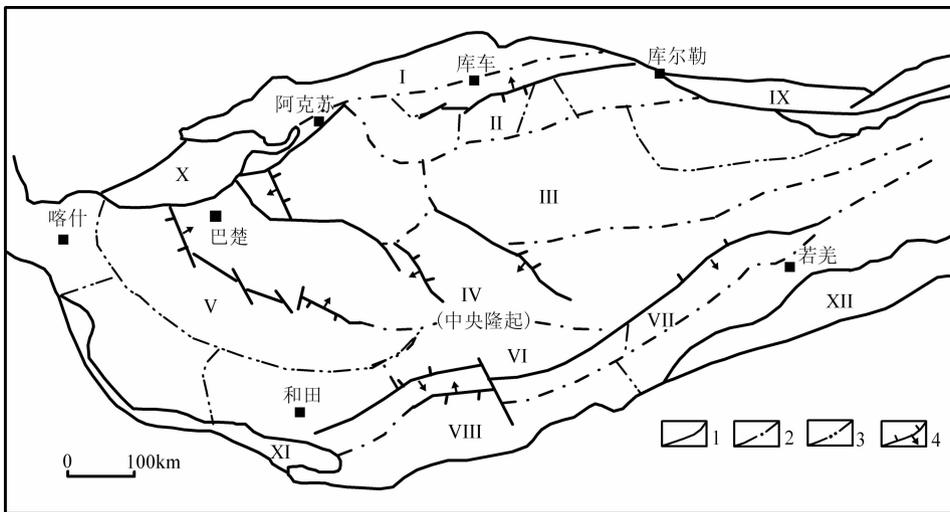


图1 塔里木盆地构造单元(据文献[5]修改)

- 1. 塔里木盆地边缘; 2. 盆地一级构造单元界限; 3. 盆地二级构造单元界限; 4. 断层;
- I. 库车坳陷; II. 塔北隆起; III. 北部坳陷; IV. 中央隆起; V. 西南坳陷; VI. 塘古孜巴斯坳陷;
- VII. 塔南隆起; VIII. 东南坳陷; IX. 库鲁克塔格断隆; X. 柯坪断隆; XI. 铁克里克断隆; XII. 阿尔金断隆

Fig.1 The tectonic elements of the Tarim basin

包括盆地边界大断裂和构造单元边界断裂在内的深大断裂及盆地内部主要涉及盖层的断裂,通过重力水平总梯度异常(图2),重力影像处理等方法可以得到有效的提取,因为一些深大的活动断裂是新构造运动的结果,在地表有良好的反映,多和山脉相关,因此,又可以通过遥感资料进行识别.基底内幕隐伏断裂,没有或基本不涉及盖层,这类断裂平面

上的识别主要通过磁场异常.

断层使其上下盘物性差异明显,重力梯度值大,断裂的在重力水平总梯度图上的识别标志是重力梯度的高值呈线性展布.图2中看出,边界及盖层断裂主要分布在盆地周缘,盆地内除巴楚凸起发育北西向断裂外,其余地区不显著.盆地周缘深大断裂基本平行于周缘山系,反映了山系向盆地内的挤压,延伸

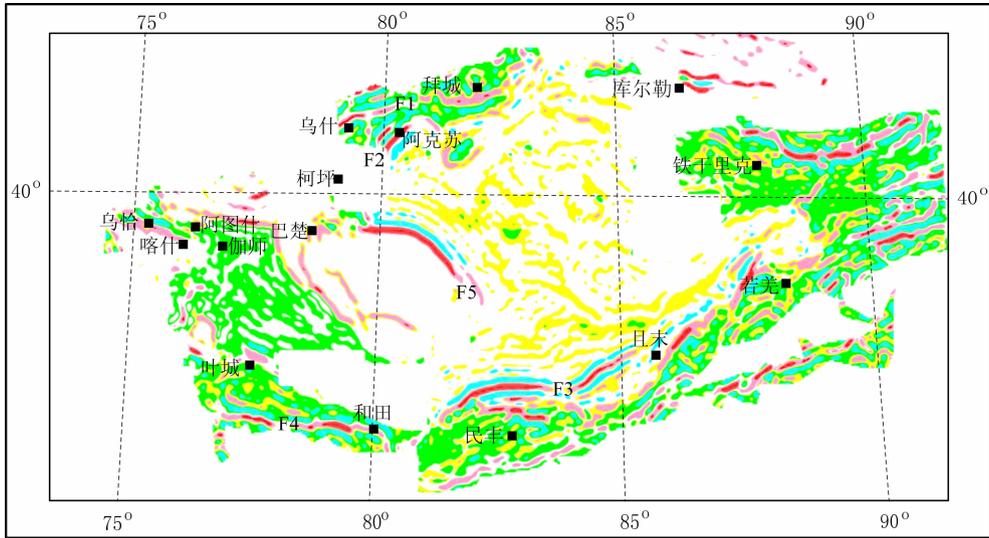


图2 塔里木盆地重力水平总梯度图

Fig. 2 The gravity gradients of the Tarim basin

长,涉及深度巨大.以向盆地内逆冲的四个断隆的前缘断裂为主,可划分为四个断裂系:天山山前断裂系(代表断裂如图2中F1、F2,沿乌什、阿克苏至拜城、新和一带呈北东东向展布)、库鲁克塔格断裂系(沿库尔勒、尉犁至铁干里克一带呈北西向展布)、阿尔金山前断裂系(代表断裂如图2中F3,沿民丰至且末至若羌一带呈北东向展布)、昆仑山山前断裂系(代表断裂如图2中F4,沿叶城至和田一带呈北西向展布).

1.2 塔里木盆地主要断裂与地震的关系

自2005年以来,塔里木盆地内发生里氏5.1级以上地震6次(据中国地震台网中心信息):乌什于2005年2月15日、16日两天连续分别发生6.2级、5.1级地震;同年4月6日,该地又发生5.1级地震;2005年8月25日、26日,阿瓦提与巴楚间、墨玉分别发生5.1级、5.2级地震;2006年9月12日,和田发生5.4级地震.而近两年这6次规模比较大的地震都发生在西昆仑和南天山的山前俯冲带.据以往统计资料,塔里木盆地内所有地震数据中的85%是分布在塔西南和西南天山的南缘区域^[1].

根据徐锡伟等人(2006)的研究,天山地震带的地震发生多与断层活动有关,如中天山地震带1889年阿拉木图8.1/4级地震,发震构造为山前逆断裂—褶皱带.南天山曾发生最大震级为8.1/4级的1902年阿图什地震,发震构造为天山构造带与昆仑山构造带间带有走滑分量的NEE向逆断裂.天山地区7级以上地震常发生在新生代前陆盆地边缘的逆断裂

—褶皱带上,6级左右地震或者发生在山间盆缘/山麓近EW向逆断裂—褶皱带上,或者发生在NW向“类转换断层”上,发震构造主要为NEE、NW和近EW向逆断裂^[1].因此,塔里木盆地的边缘的大规模地震,基本上都与南天山和昆仑山上的山前断裂系相关.

另外,虽然库车—阿克苏之间、若羌一带、民丰、叶城等地,山前带走向平行的断裂也十分发育,然而历次中、强地震的震中大多分布在以阿克苏—且末一线的西部,而东部则极少.从图2可以看出,该处发育了盆地内部唯一显著的断裂系:以色列布亚断裂(F5)为代表的巴楚深断裂系.以北西向大断裂为主的该组断裂系控制了巴楚凸起的形成^[6].这组断裂规模、切割深度都非常大.巴楚凸起上相同方向分布的基底岩墙群可能代表这组断裂切割达及地幔^[7].以色列布亚断裂倾角为70°~80°,向深部逐渐变缓,延伸长约90 km,并与柯坪断隆上的皮羌断裂连为一条,具有强烈的扭动走滑性质^[6].

反射地震的资料显示:西部主要是中、新生界挤压背斜构造,而东部则主要是古生界地台背斜或潜山~背斜构造.李海兵、许志琴等(2001)也认为,塔里木盆地的西部两个山前带(天山山前带、西昆仑山前带)以推覆为主兼具走滑作用,东部两个山前带(阿尔金山前带、库鲁克塔格山前带)则以走滑为主^[8].由图2中可以看出,F1、F2、F4,平面上表现为由造山带向盆地内逆冲而向前凸出的弧形断裂.而这些断层至今还在活动并伴随地震活动^[6].因此,以

F1、F2 为代表的南天山山前断裂系和以 F4 为代表的昆仑山山前断裂系是盆地边缘与地震关系最密切的两大断裂系。

2 主要活动断裂的深部特征

2.1 乌什断裂

据柔洁等(2005)的研究,2005年2月15日乌什6.2级地震的南北两端曾分别发生过1915年12月17日的6.5级地震及1969年2月12日的6.5级地震,地震点呈北东向条带分布,与北东方向展布的区域构造方向一致^[9](图3)。证实了该地区地震发生分布,在平面上和断层的展布有着密切的关系。乌什县处于断层交汇部位,本次地震的烈度等震线,大体北东方向沿断裂带展布^[9]。迈丹断裂、阿合奇和喀拉塔格断裂、乌什断裂为这一地区的主要断裂。

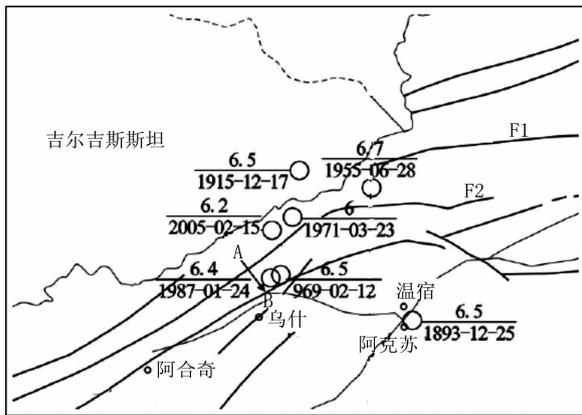


图3 新疆乌什地区历史地震资料图(据文献[7]修改)

Fig. 3 Distribution of historical earthquakes in the Wushi area.

乌什断裂(F1)展布于乌什以北呈北东方向展布,与基底深大断裂相对应。在图4上可以看出,乌什断裂推覆特征明显,错断了地表,深部断达基底,断面较平缓。

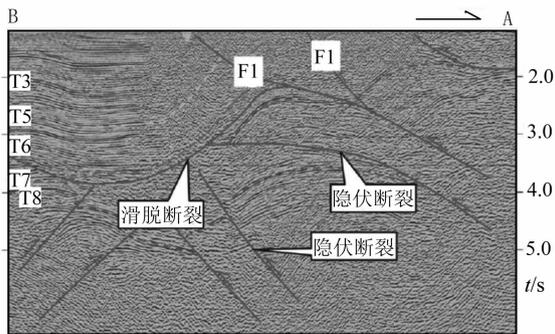


图4 地震剖面上乌什断裂

Fig. 4 The image of fault F1 on seismic section

李涛等(2005)对库车—南天山盆山耦合带的2200多个有效记录的震源深度/频次进行了统计研究,得出地震频次在4个深度段出现峰值,其中,第一个峰值在5000~6000m深度^[10],对应盖层底面,即库车前陆冲断带的主滑脱面。由于南天山的俯冲,这几个界面,特别是浅部的界面,是山前断裂的主要发生界面。乌什地震带地震的产生机制,被证实和山前断裂的活动有关。从地震剖面上看,F1在6000m深度附近(该区地震波速度为4000m/s左右,双旅时间3s处,深度约为6000m)断面收敛到同一界面上,这一界面对应的深度正与地震频次出现峰值的第一个界面深度一致。

2.2 柯坪塔格断裂

根据徐锡伟,沈军(2005)等人的研究,2003年2月24日发生在新疆塔里木盆地的巴楚—伽师6.8级地震与塔西南坳陷东侧麦盖提斜坡带上发育的一组NNW向隐伏逆断层有关。这次地震是盆地内一条近EW向北倾逆断层自NW向SE由深至浅破裂的结果,震源机制解则以逆断型为主,主体发震构造推测为柯坪塔格推覆构造系西段南缘隐伏的多重推覆盲逆断层^[1],并且在震区所处的塔里木盆地西部发现了显著的新构造活动的标志,认为这种新构造运动是巴楚—伽师6.8级地震的重要原因^[10]。这些断层属于以柯坪断隆前缘断裂(F2)为代表的柯坪断隆逆冲推覆断裂系的西缘。

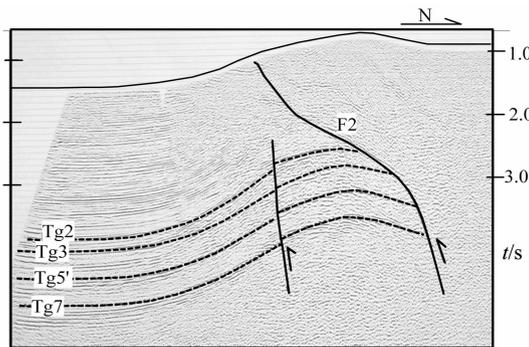


图5 地震剖面上柯坪塔格断裂

Fig. 5 The image of fault F2 on seismic section

柯坪塔格断裂(F2)为柯坪塔格逆冲推覆系统的前缘边界断裂,在地表、重力、地震剖面上均有明显异常和显示,为柯坪塔格弧形推覆系统的前缘主断裂,北西西—北东东走向,长近320km,东起柯坪,西至七盘水磨^[11]。在平面上,局部地表构成弧形断裂,巴楚凸起及麦盖提斜坡带被逆掩于柯坪塔格推覆体之下^[12]。图5显示,断面北倾,上部陡倾中部

较缓呈铲式,深部沿寒武系底部逆冲滑脱,并断达基底.该断裂与柯坪断隆之上与之平行的多条逆冲推覆断裂组成柯坪断隆逆冲推覆断裂系,控制了断隆的基本构造形态,该断裂系向西延伸部位断面逐渐平缓,皮羌断裂以西,盲冲断层较发育.

2.3 铁克里克北缘断裂

2005年8月26日5时8分,位于西昆仑西段,处于塔里木块体与西昆仑交汇地区的新疆墨玉县发生MS5.4地震.据李志海等人(2006)的研究,这次地震的发震构造是塔里木南缘活动断裂,该断裂长312 km,逆断层,走向为NW,断层面西倾向南,倾角 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$.这次地震发生后,哈佛大学和美国地质调查局都给出了其震源机制解,并且两结果基本一致,根据其发震构造和震源机制解得出,这次地震震源的断错性质是倾滑逆断层,主压应力方位 $N15^{\circ}E$,与该地区的区域应力场方向近NS向基本一致^[13].该断裂即铁克里克北缘断裂(F4).

铁克里克北缘断裂是西昆仑褶皱带东段与西昆仑山前冲断带的边界断裂,位于铁克里克断隆北缘,西起吐孜拉普河,往西可能被北东向的吐孜拉普河断裂切断后与库斯拉甫断裂相接.表现为上古生界、下古生界和元古界变质岩逆冲于北侧的中新生界之上,断裂上盘下古生界发生浅变质作用为一套浅变质岩,而断层下盘盆地内下古生界地层为正常沉积地层.连续大地电磁测深(CEMP)剖面(图6a)上该断裂带十分清楚,表现为高阻与低阻的分界,断裂南侧上盘地层电阻率基本上大于 $100\ \Omega\cdot m$,北侧下盘地层电阻率基本上小于 $50\ \Omega\cdot m$.该区的地震剖面明显反映出断面具上陡下缓的特征,表明该断裂具有滑脱性质.该断裂的前缘还发育系列倾向一致的断裂,断面错断基底并向深部收敛.地震剖面(图6b)刻画出的断裂形态与大地电磁测深剖面所显示

的基本一致.

该断裂在晚加里东末一早海西期就已形成,根据该断裂断开第四系,并使古生界、元古界逆掩在第四系西域组砾岩之上及断裂切割前期形成的褶皱的轴线等现象,可以判定该断裂主活动期在上新世末,而从铁克里克断隆在早更新世有较大幅度隆升来看,该断裂在早更新世期间仍然有一定程度的活动并活动至今^[13].

3 利用地球物理方法研究塔里木盆地活动断裂的实际意义

白文吉(1985)指出,在扩张盆地边缘(即盆地与山脉结合带)散布的地震点,以浅源为主,地震点围盆地分布,其中较深地震位于远离盆地的山脉中,地震常可能倾向于山脉^[3].这些地震形成的机制是由于盆地扩张,使盆地与山脉的结合带不断受到挤压产生脆性破裂引起的,构成盆地中部为稳定区、而盆地周围山脉为地震频繁区的格局.这正是塔里木盆地地震产生的主要机制和特征.塔里木盆地西部位于帕米尔、南天山、昆仑山的聚合部位,随着印度洋板块与亚欧板块的强烈碰撞,在近南北向挤压应力作用下,新构造运动变得很剧烈.塔里木盆地现在还在扩张,天山正在抬升,盆地的俯冲作用还在进行^[14],地震的活动也在继续.因此,研究主要活动断裂的深部结构,对了解地震产生机制以及圈定地震可能发生位置,有一定的意义.近年来,已经有众多的学者通过地球物理方法研究地震带的断裂特征^[15~23].不同的地球物理方法采用的地球物理场具有不同穿透能力,因而探测深度也不同.另外,地球物理资料存在不可避免的多解性,单方法的研究受到的限制很多,各种方法的组合则可相互验证和补充,提高探测的精度和可信度.

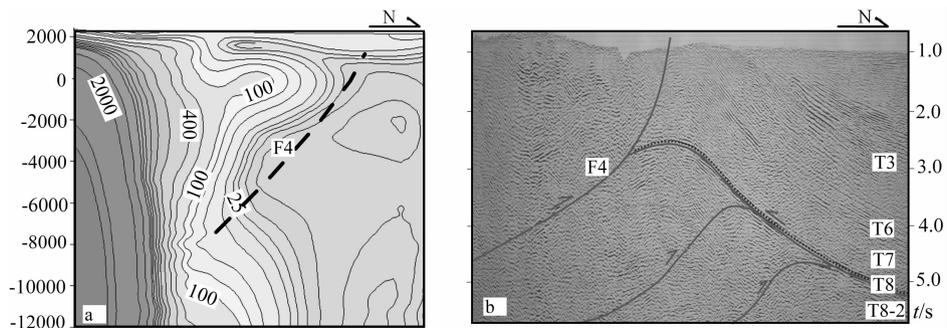


图6 电法和地震剖面上铁克里克北缘断裂

Fig. 6 The image of fault F4 on CEMP and seismic section

4 结 论

(1)塔里木盆地的天然地震主要发生在盆地边缘的断裂带上。皮羌断裂将塔里木盆地分为东西两部分,西部两个山前带,天山山前带和西昆仑山前带是地震主要发生区,东部的山前带相对不容易发生地震的。这是因为具有强烈走滑压扭性质皮羌断裂是盆地东西部两种不同构造特征的分解:西部山前带已推覆作用为主兼具走滑性质,东部山前带以走滑作用为主。

(2)塔里木盆地西部断裂带的构造形式与活动性主要受控于南天山与帕米尔的对冲挤压活动,所以该区活动构造主要平行与山体展布,以逆冲挤压活动为主,主要断裂推覆性质明显。昆仑山山前断裂系和南天山山前断裂系是塔里木盆地边缘与天然地震关系最密切的两大断裂系。

(3)通过地球物理资料研究断裂的平面展布形态和深部地质结构,进而寻找地震产生的构造证据,是一个行之有效的手段。通过地球物理方法研究活动断裂,对认识地震带的分布规律有一定参考意义。

参 考 文 献 (References):

- [1] 徐锡伟,张先康,冉勇康,等.南天山地区巴楚—伽师地震(MS6.8)发震构造初步研究[J].地震地质,2006,28(2):161~178.
Xu X W, Zhang X K, Ran Y K, *et al.* The preliminary study on seismotectonics of the 2003 AD Bachu-Jiashi earthquake (MS6.8), Southern Tian Shan[J]. Seismology and geology, 2006, 28(2):161~178.
- [2] 邵辉成,刘华峰,岳珠峰.应用最优化模型分析活断层与地震的关系[J].地震地质,2006,28(3):405~410.
Shao H C, Liu H F, Yue Z F. Analyzing the relation between earthquake and active fault based on the parameter optimization model [J]. Seismology and geology, 2006, 28(3):405~410.
- [3] 李涛,王宗秀.塔里木盆地及邻区岩石圈拆离解耦与盆山格局关系的天然地震分析[J].地学前缘,2005,12(3):125~136.
Li T, Wang Z X. The lithospheric decoupling of the Tarim Basin and surrounding orogenic belts and its relationship with basin mountain patterns from the analysis of natural earthquake[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3):125~136.
- [4] 贾承造,魏国齐.“九五”期间塔里木盆地构造研究成果概述[J].石油勘探与开发,2003,30(1):11~14.
Jia C Z, Wei G Q. The summary of the achievements on the tectonic researches in Tarim basin during the period of 9th Five Year Plan[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1):11~14.
- [5] 李曰俊,贾承造,胡世玲.塔里木盆地瓦基里塔格辉长岩 40Ar-39Ar 年龄及其意义[J].岩石学报,1999,15(04):594~599.
LI Yue-jun, JIA-Chengzao, HU Shiling. The 40Ar-39Ar isotopic age of Wajilitag gabbro in Tarim basin and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(4):594~599.
- [6] 肖安成,杨树峰,王清华,等.塔里木盆地巴楚—柯坪地区南北向断裂系统的空间对应性研究[J].地质科学,2002,37(增刊):64~72.
Xiao A C, Yang S F, Wang Q H, *et al.* Corresponding relation of S-N-striking fault systems in the Bachu-Kalpin area, Tarim Basin[J]. Chinese journal of geology, 2002, 37(sup):64~72.
- [7] 徐鸣洁,王良书,钟楷,等.塔里木盆地重磁场特征与基底结构分析[J].高校地质学报,2005,11(4):585~592.
Xu M J, Wang L S, Zhong K, *et al.* Features of gravitational and magnetic fields in the tarim basin and basement structure analysis[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(4):585~592.
- [8] 许志琴,曾令森,杨经绥,等.走滑断裂、“挤压性盆-山构造”与油气资源关系的探讨[J].地球科学——中国地质大学学报,2004,29(6):631~643.
Xu Z Q, Zeng L S, Yang J S, *et al.* Role of large scale strike slip faults in the formation of petroleum-bearing compressional basin-mountain range systems[J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(6):631~643.
- [9] 柔洁,艾买提·乃买提.2005年2月15日新疆乌什6.2级地震的地震环境及强震加速度记录[J].国际地震动态,2005,315(3):19~22.
Rou J, Aimaiti·Naimaiti. Seismic environment and acceleration record about the earthquake with MS 6.2 in Wushi of Xinjiang, China on Feb. 15, 2005[J]. Recent Developments in World Seismology, 2005, 315(3):19~22.
- [10] 沈军,陈建波,王翠,等.2003年2月24日新疆巴楚—伽师6.8级地震发震构造[J].地震地质,2005,28(2):205~212.
Shen J, Chen J B, Wang C, *et al.* The seismogenic tectonics of the Ms 6.8 Bachu-Jiashi, Xinjiang Earthquake in Feb. 24, 2003[J]. Seismology and geology, 2005, 28(2):205~212.
- [11] 肖安成,杨树峰,李曰俊,等.塔里木盆地巴楚—柯坪地区新生代断裂系统[J].石油与天然气地质,2005,26(1):79~85.
Xiao A C, Yang S F, Li Y J, *et al.* A studying of Cenozoic fracture systems in Bachu-Kalpin area, Tarim Basin[J]. Oil and gas geology, 2005, 26(1):79~85.
- [12] 何文渊,李江海.塔里木盆地柯坪断隆断裂构造分析[J].中国地质,2002,29(1):37~43.
He W Y, Li J H. Analysis of fault structures in the Kalpin fault uplift, Tarim basin[J]. Geology in China, 2002, 29(1):37~43.
- [13] 李志海,王筱荣.2005年8月26日新疆墨玉5.4级地震序列[J].国际地震动态,2006,328(4):29~32.
Li Z H, Wang X R. Seismic sequences of moyu earthquake (Ms 5.4) on Aug. 26, 2005 in Xinjiang[J]. Recent Develop-

- ments in *World Seismology*, 2006, 328(4): 29~32.
- [14] 高长林,叶德燎,张玉箴等. 2003. 塔里木中新生代盆地扩张和盆地俯冲与地幔柱[J]. *石油实验地质*, 25(6): 661~678.
Gao C L, Ye D L, Zhang Y J, *et al.* Extension and subduction of the Meso-Cenozoic Tarim basin and their relationship with mantle plume[J]. *Petroleum geology and experiment*, 2003, 25(6): 661~678.
- [15] 王有学, W D Mooney, 韩果花, 袁学诚, 姜枚. 台湾-阿尔泰山地学断面阿尔金-龙门山剖面的地壳纵波速度结构[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 98~105.
Wang Y X, Mooney W D, Han G H, Yuan X C, Jiang M. Crustal P-wave velocity structure from Altyn Tagh to Longmen mountains along the Taiwan-Altay geoscience transect [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2005, 48(1): 98~105.
- [16] 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.*, 2005, 48(1): 115~122.
- [17] 周仕勇, Irikura K. 近震源地震波波形资料反演震源破裂过程的可靠性分析[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 123~131.
Zhou S Y, Irikura K. Analysis on the reliability of the earthquake rupture process inferred from near source waveforms [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2005, 48(1): 123~131.
- [18] 王谦身, 滕吉文, 王光杰, 徐亚. 内蒙古阴山地区特异区域重磁场与深部构造[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(2): 314~320.
Wang Q S, Teng J W, Wang G J, Xu Y. The region gravity and magnetic anomaly fields and the deep structure in Yinshan mountains of inner Mongolia [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2005, 48(2): 314~320.
- [19] 王卫民, 李丽, 赵连锋, 李娟, 姚振兴. 2003年2月24日新疆伽师 MS6.5 级地震震源破裂过程研究[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(2): 343~351.
Wang W M, Li L, Zhao L F, Li J, Yao Z X. Rupture process of Jiashi, Xinjiang earthquake (MS 6.5) of Feb. 24, 2003 [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2005, 48(2): 343~351.
- [20] 黄媛, 杨建思, 张天中. 2003年新疆巴楚-伽师地震序列的双差法重新定位研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 162~169.
Huang Y, Yang J S, Zhang T Z. Relocation of the Bachu-Jiashi, Xinjiang earthquake sequence in 2003 using the double-difference location algorithm [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2006, 49(1): 162~169.
- [21] 马超, 单新建. 昆仑山 MS8.1 地震震源参数的多破裂段模拟研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(2): 428~437.
Ma C, Shan X J. A multi-segment analytic modeling of hypocentral geometric characteristic parameters of the MS8.1 earthquake at the Kunlun Mountains [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2006, 49(2): 428~437.
- [22] 杜学彬, 马占虎, 叶青, 等. 与强地震有关的视电阻率各向异性变化[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(1): 93~100.
Du X B, Ma Z H, Ye Q, *et al.* Anisotropic changes in apparent resistivity associated with strong earthquakes [J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(1): 93~100.
- [23] 李均之, 陈维升, 夏雅琴, 等. 昆仑山口西 Ms8.1 级地震前兆[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(2): 340~344.
Li J Z, Chen W S, Xia Y Q, *et al.* The precursors of Ms8.1 earthquake occurred in west of mountain gap of Kunlun, China [J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(2): 340~344.