

北天山中段近期重力场变化特征研究^①

刘代芹, 李 杰, 王晓强, 艾力夏提·玉山, 陈 丽, 李桂荣, 孙晓旭, 李 瑞

(新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:利用北天山中段最新的流动重力观测数据,通过整理计算平差,绘制该地区半年和一年尺度的重力场变化图像;选取横跨北天山中段乌鲁木齐、独山子两条测线,并分别绘制其重力剖面变化图;结合北天山中段地区动力构造环境,剖析该地区重力变化特征及其与地震孕育之间的关系。分析表明:北天山中段地区重力异常变化值不大,重力变化等值线图和剖面变化图均能较好地反映重力场随时空变化特征;北天山中段动态重力变化特征基本反映了该地区动力构造运动的外部环境;研究区域内的重力场空间格局分布特征较清晰,其重力变化具有明显的分区特征,山体和盆地之间的重力变化具有显著差异,山体与盆地边缘正负重力变化交替出现,且变化相对较平稳。

关键词:北天山;重力场;重力剖面;构造环境

中图分类号:P312

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2015)04-1001-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1001

Recent Variation Characteristics of Gravity Field in the Middle Segment of North Tianshan

LIU Dai-qin, LI Jie, WANG Xiao-qiang, Ailixiati · Yushan,

CHEN Li, LI Gui-rong, SUN Xiao-xu, LI Rui

(Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: We analyzed the variation in gravity field in the middle segment of northern Tianshan Mountains in half- and one-year scales by calculating and adjusting the latest mobile gravity observation data. By selecting two lines across Urumqi and Dushanzithe in the middle section of northern Tianshan and plotting the gravity anomaly profiles of these two lines, the relationship between characteristics of gravity anomaly and earthquakes as well as the dynamic tectonic environment of northern Tianshan Mountains were analyzed. The analysis shows that the middle section of northern Tianshan does not exhibit evident anomaly in gravitational distribution, even when the half-or one-year scale of gravitational anomaly images reflect the characteristics of temporal and spatial variations of gravity field in the study area well. Gravity anomaly characteristics of the middle section of northern Tianshan typically reflect the external environment of dynamic tectonic movements, and the different gravity change mechanisms and tectonic environment are closely related. The spatial distribution characteristics of gravity field are clear in the study area, and the gravity field anomalies exhibit obvious zoning features. Clear differences can be seen between mountain and basin areas, and the positive and negative gravity anomaly values typically appear at the mountain and basin edges. Further, the gravity anomaly value is minimal. The grav-

① 收稿日期:2014-11-14

基金项目:地震科技星火计划(XH14054Y);国家自然科学基金(41374030, 41474016, 41274036);新疆地震科学基金(201410, 201411, 201412)

作者简介:刘代芹(1979—),男(汉族),山东人,高级工程师,硕士,主要从事重力测量、大地测量以及地壳形变分析研究工作。

E-mail: xjdztldq@126.com。

ity profile result shows that the gravity field exhibits an increasing trend in the central part of the northern Tianshan area, thus indicating that the underground substances are under a state of quality loss distribution. The northern Tianshan area that is squeezed between the Tibetan plateau and the Euroasian plate caused the orogenic uplifting of Tianshan, decrease in gravity value, density of crust under the state of quality loss, and the negative gravity value. The Dzungaria Basin in the north slope of northern Tianshan exhibits southward migration and a decreasing trend, with steady increase in crustal substances. The positive change in gravity field shows that the crustal substances of this area are accumulated via continuous squeezing. The variations in spatial and temporal characteristics of gravity field and those of crustal material density are nearly identical and reflect the progress in migration of crustal substances in the middle section of northern Tianshan area. This migration in crustal substances leads to the variations in crustal density and consequent variations in spatial position of gravity and ground points.

Key words: North Tianshan; gravity field; gravity profile; tectonic environment

0 引言

北天山中段是 中国 大陆地壳运动最强烈,地震活动频度最高、强度最大的地区之一。1900 年以来曾发生过 1906 年玛纳斯 $M_s7.7$ 地震、1934 年乌鲁木齐西山 $M_s6.0$ 地震、1944 年乌苏 $M_s7.2$ 地震、1949 年库车 $M_s7.2$ 地震以及 1965 年乌鲁木齐市东北方向的 $M_s6.6$ 地震。该地区的断裂绝大多数属于全新世以来活动断裂,具备发生中强地震的孕育条件^[1]。新疆地区强震活动时空特征分析表明,北天山地区是未来强震的可能主体活动区域^[2]。该地区自 1979 年库车 $M_s6.0$ 地震以来,6 级地震平静长达 32 年后,于 2011 年 11 月 1 日发生了巩留—尼勒克 $M_s6.0$ 地震,打破了该区的宁静。时隔 7 个月后,于 2012 年 6 月 30 日在新源—和静交界处又发生了 $M_s6.6$ 地震。这在一定程度上表明,北天山地区正处于区域构造应力积累阶段。

北天山中段是中外地震专家一直重点关注的地震活动强烈的地区之一,国内外诸多学者利用各种观测手段对该区地震活动性开展了大规模的研究,如李杰等^[3]利用 GPS 数据初步研究了中部天山地壳形变特征;赵翠萍等^[4]利用格林函数研究了新疆北天山中东段地区震源参数;姜枚等^[5]利用地震层析和接收函数研究了青藏高原隆升对新疆天山山脉上地壳—上地幔结构的影响;高国英等^[6]对 2006 年 11 月 23 日乌苏 $M_s5.1$ 地震后北天山地震形势作了详细分析;龙海英等^[7]对北天山中东段小震震源机制解及应力场进行了反演;李志海等^[8]对新疆北天山地震的尾波衰减系数进行了研究等。但目前鲜有利用流动重力资料研究北天山中段地区重力场变化特征的成果^[9]。为准确获取北天山中段地区重力异

常信息,并深入认识重力与形变观测量的物理实质关系,开展区域物质运移以及重力变化关联特性的研究,2013 年新疆维吾尔自治区地震局(以下简称新疆地震局)针对北天山中段进行布网及改造工作,并进行每年两期的流动重力观测,此项工作的开展有助于进一步了解该区域构造环境的动力变化、地壳内部运动及强震孕育过程。

1 重力网布设及数据处理情况

1.1 北天山中段流动重力布设情况

2012 年 7 月新疆地震局对北天山中段地区进行了初步重力网布设,2013 年 6 月对该网进行扩大。目前该网由 46 个监测点组成,其中包含 4 个陆态网络观测站(乌鲁木齐、石河子、独山子、乌拉斯台)和 1 个 CORS 站(五家渠),沿北天山经济带横跨天山中段,纵向沿 S101 道路进行布设(图 1)。监测范围涵盖北天山中东段、准葛尔盆地南缘等广大区域。

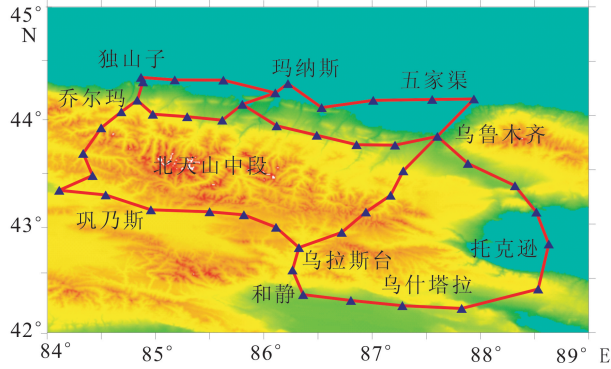


图 1 北天山中段重力网分布图

Fig.1 Distribution of gravity network in the middle area of Northern Tianshan

1.2 数据处理及利用情况

使用中国地震局两台高精度 CG5 型重力仪 (207[#]、511[#]) 进行每年两期的野外观测工作。该重力仪的观测精度均符合规范要求,即自差小于 $25 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,互差小于 $30 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,解算平均点值精为 $8.7 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,观测单位权中误差为 $8.2 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,合格率达到 100%。室内数据处理采用中国地震局攻关软件 LGADJ,首先对每期数据进行平差计算,选取相对稳定且参与全国综合地球物理场绝对重力观测点(乌鲁木齐)作为起算点,在计算过程中对少数存在较大误差的观测段差实行粗差剔除和降权处理,并合理确定各台仪器的先验方差后,以 $5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 精度定权绝对重力资料观测结果,采用迭代计算确定计算过程^[10]。最终计算结果表明,各期结果的点值精度均在 $(5 \sim 10) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,任意两期结果获得的重力变化精度在 $10 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 左右。

2 北天山中段重力场变化特征分析

2.1 区域重力场变化特征

本文根据计算结果绘制了半年和一年尺度的重力变化图像(图 2、图 3)。图中红色实线表示重力变化的零值线,黑色实线表示重力变化为正值(增加),黑色虚线表示重力变化为负值(减小),黑色三角点为重力观测点位。

(1) 半年尺度重力变化图像

2013 年 5—8 月观测结果[图 2(a)]表明,此时段北天山中段重力场分布格局较清晰,即重力变化零线位于巩乃斯—和静—乌拉斯台—乌鲁木齐附近,零线以南为重力变化的正值区。另外,除了在独山子附近重力变化出现了小范围的零线闭合区域,其他地区均为负值变化;重力变化的高梯度带乌鲁木齐西南地区,变化量为 $\pm 40 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。2013 年 8 月至 2014 年 5 月观测结果[图 2(b)]显示,以五家渠、玛纳斯、独山子和巩乃斯为界,重力场变化出现北正南负变化趋势,山体重力变化基本为负值区域,而在山体以北,重力变化为正值区。由于重力场随时空不断演化,比较图 2(a)与图 2(b)观测结果可以看出,重力场出现了反向调整,这可能与 2013 年 3 月 29 日昌吉、乌鲁木齐交界(43.4° N , 86.8° E)发生的 $M_s 5.6$ 地震有关,震后重力场出现了大范围的调整。2014 年 5—8 月观测结果[图 2(c)]与 2013 年 8 月至 2014 年 5 月相比,重力场分布由原来的近南北向调整为北西向,零线分布在呼图壁至

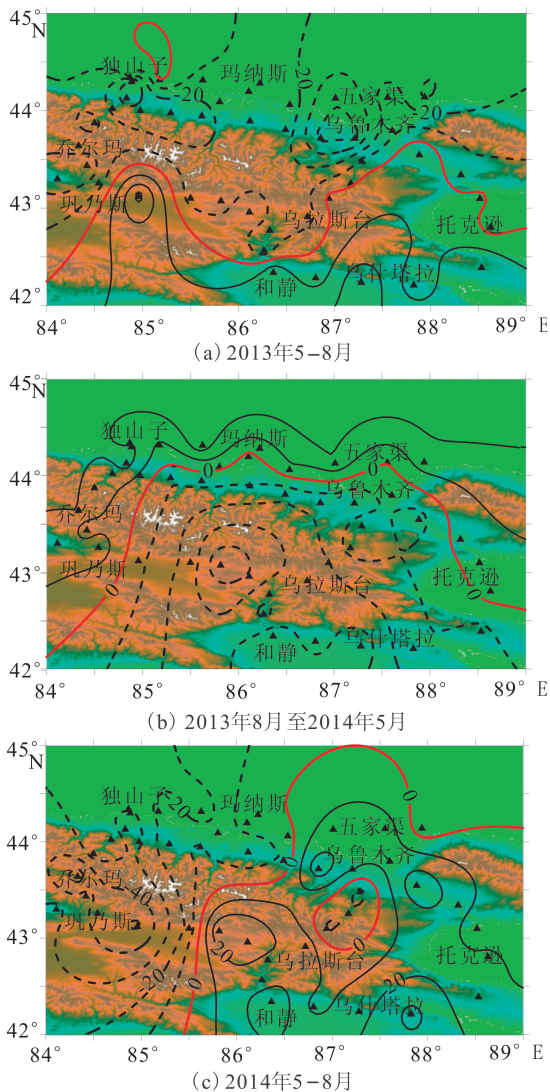


图 2 北天山中段重力场变化图像(半年尺度)

Fig.2 The image of gravity field variation in the middle area of Northern Tianshan (half-year scale)

巴伦台以西地区,且在后峡至乌拉斯台出现了小范围的闭合区域。

(2) 一年尺度重力变化图像

一年为尺度的重力变化图像可以较好地消除一些外界因素(温度、水文、季节性)的影响。通过一年尺度重力场变化图像(图 3)可以看出,无论是 2013 年 5 月至 2014 年 5 月重力变化图像[图 3(a)]还是 2013 年 8 月至 2014 年 8 月[图 3(b)]观测结果均显示,重力变化的负值区域位于山体附近,表明北天山中段目前正处于隆升和密度减小的变化趋势,而位于吐鲁番盆地西北段的托克逊地区,重力变化均为正值,说明该处受到北天山东段的构造推挤作用,致使部分物质发生了运移,使托克逊附近地区物质密度不断增大。通过一年尺度重力场变化图像[图 3

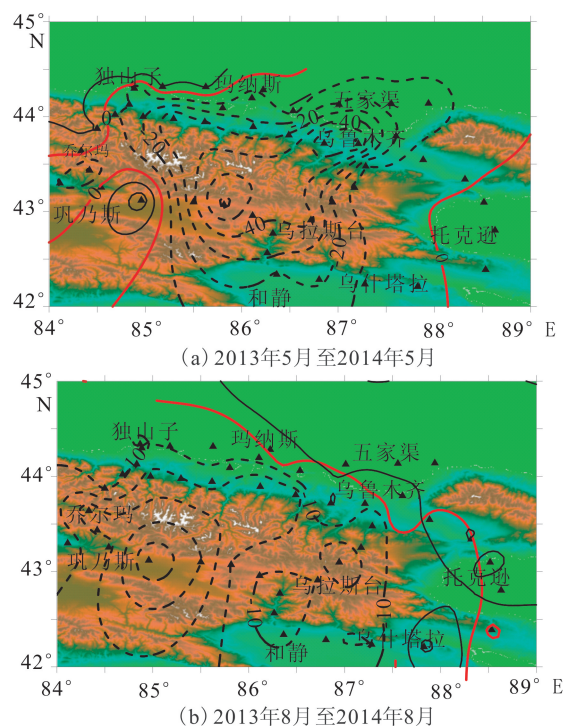


图 3 北天山中段重力场变化图像(一年尺度)

Fig.3 The image of gravity field variation in the middle area of Northern Tianshan (one-year scale)

(b)可以看出,重力场变化基本延续 2013 年 8 月至 2014 年 5 月观测结果,即重力场分布出现北正南负变化格局,北天山中段山体重力变化基本上为负值区域,山体北坡(准噶尔盆地南缘)为重力正值变化区,零线位于玛纳斯—乌鲁木齐—乌什塔拉附近。零线以北区域重力变化表现为正值区,表明该区域地壳物质不断运移而且集中,从而也说明了该地区地壳运动呈现出下沉和地壳密度处于增加趋势;而零线以南地区重力变化为负值区,表明该区地壳正处于隆升的过程,地壳物质密度在不断变小。

天山中部地区发生若干 5、6 级地震,属于中强地震多发区,且地震多发于重力正负值变化交替的零线附近或高梯度带上。根据研究经验表明,此结果与近几年发生的多数地震基本一致,正负重力异常变化梯度带附近是物质增减差异剧烈的地区,能量易于积累从而产生地震。无论从半年还是一年尺度的重力变化图像都可以清楚看出,北天山中段重力场变高梯度带相对不大,最大变化量达到 $\pm 50 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,且伴随有重力变化零线出现,因而在该区域将极有可能发生 $M_s 5.5$ 左右地震。

2.2 重力剖面变化分析

重力等值线变化图能较好地反映较大范围的趋势性变化,而重力剖面变化图像则能较好地反映各

个测线(段)的实际变化情况。为了进一步认识异常区域的流动重力变化趋势,较好地分析该区域地震活动与重力变化之间的响应关系,为地震中长期预报提供可靠的资料,本文有针对性地选择了分别横跨北天山东段和中部区域的乌鲁木齐—乌拉斯台、独山子—巩乃斯—库车两条剖面。利用全国综合物理场观测结果(绝对重力值)拟推出各点绝对重力变化值,并计算各重力点异常变化量,最终绘制了这两条重力剖面变化图(图 4)。

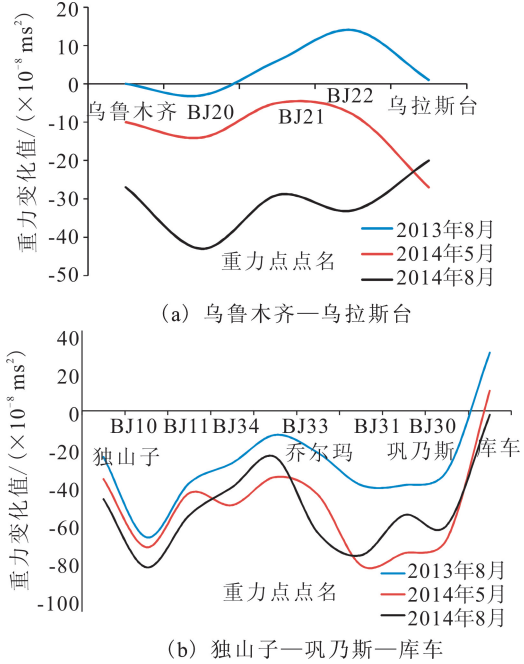


图 4 重力剖面变化图

Fig.4 Profile of gravity variation

从图 4 可以清楚看到,2013 年 8 月—2014 年 8 月时段内,乌鲁木齐—乌拉斯台测线[图 4(a)]各点随着时间推移重力值变化量不断减小(除乌拉斯台),即各点变化量为负值,而变化量最大的点为 BJ22,累计变化量为 $-44 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。该点位于乌鲁木齐后峡老虎口附近,海拔相对较高,表明该地区山体在不断隆起,物质密度处于不断减小的趋势。从 2014 年 5 月至 2014 年 8 月可以看出乌拉斯台重力点位变化有所增加,该点位于北天山南坡,说明该地区受到的构造的应力有所增强。独山子—巩乃斯—库车测线[图 4(b)]横跨北天山中段,计算结果显示该测线重力变化最显著区域为 BJ34 至乔尔玛附近。2013 年 8 月和 2014 年 5 月两时段重力观测结果显示,该地区重力变化整体在不断减小,但从 2014 年 8 月观测结果可以清楚看到该区域重力场出现反向调整,即 2014 年 8 月相对于 2014 年 5 月各点重力

变化处于不断增强的趋势,从而表明该地区地壳运动相对活跃,但该测线两端重力变化趋势不大,且变化保持一致性。

整体分析测区两条测线剖面图(图 4)可以看出,上述两条测线重力正处于正负交替变化的趋势,各点重力变化有所增强,特别是独山子—巩乃斯—库车测线较好地反应出该测线大多数重力测点处于增加趋势,且正负重力变化交替出现,值得关注。

3 重力变化与地震、构造活动的关系

通常重力场变化大小与深部构造密切相关,这种构造的物性差异通常会表现出明显的均衡重力异常变化特征^[11]。通过分析北天山中段重力场演化过程可以发现,该地区重力场变化的形态异常,重力变化空间梯度不大,但重力场变化时常呈正负交替出现,测区内有发生中强地震的可能。在中强地震的孕育过程中,孕震区内介质的物理、力学性质会发生明显的、不同程度的变化。由重力场变化图像(图 2)可以清楚地看出,北天山中段重力变化在 2013 年 8 月至 2014 年 5 月主要表现为负值变化,2014 年 5 月至 2014 年 8 月之后呈正值变化,重力场出现了反向调整,说明该地区压陷和扩张作用交替进行。重力剖面变化特征(图 4)表明北天山中段地区各点重力值变化区域呈减小趋势,说明该区域受青藏高原和欧亚板块的挤压,致使天山再造山隆起,地壳质量处于亏损状态,重力在不断减小,为负值区;而北天山北坡准噶尔盆地向南缘运动且处于下沉趋势,地壳物质不断增加,重力正值变化显示该区地壳物质因不断挤压而堆积。

天山南北受到印度板块和欧亚板块的挤压,是受力较强烈的地区,容易积累中强震的能量。地质构造与深部构造之间有着密切联系,甚至受深部构造控制,而重力场变化包含了大量的构造活动信息^[12-13]。分析比较重力场变化与测区的构造活动关系及该地区两年多来的重力场时空动态变化,表明北天山中段重力异常不大,年变化量在 $(20\sim 50)\times 10^{-8}\text{ ms}^{-2}$ 左右。其重力场变化较显著的梯度带走向与 NW 向的准噶尔南缘断裂及博罗科努断裂、EW 向的霍尔果斯—吐鲁番断裂走向基本一致,且在构造单元的边缘出现重力等值线形态的转折和密集,形成相对较大的高梯度带。构造应力一旦发生微弱变化,很容易引起这些剩余质量的不规则重新运移和分布,从而影响地表重力场。若作用于地壳内物质运移方向上的重力受到阻挡,往往容易形成

地表的大规模挤压、推覆、逆冲与走滑构造,而北天山地区断层基本上属于逆冲与走滑为主的属性。

北天山中段重力变化具有明显的分区特征,与该地区构造动力运动分区基本一致。不同区域因大地构造环境不同、岩石圈与深部结构与动力学条件不同、地质演化历史与先存构造格局不同,重力变化机制存在差异^[10],如北天山中段现今地壳主要表现为快速缩短和隆升效应,块体边界或过渡部位往往为重力梯级变化过渡带。从一年尺度重力变化(图 3)来看,北天山中段重力场变化出现了大面积负值区域,且整个负值区域东移,说明物质运移造成物质亏损。由于东流物质受到阻挡,负重力变化逐步向正重力变化发展,位于北天山以北的准噶尔盆地重力变化相对较稳定。准噶尔盆地周边震源断错活动的主要原因从大的构造背景看,该地区处于印度洋板块与欧亚板块碰撞的东北端,其区域构造应力场活动必然受制于两大板块的共同作用。

4 结论与讨论

(1) 北天山中段地区重力场变化不大,无论以相邻两期还是以一年为尺度的重力变化图像均能较好地反映重力场随时空的变化。

(2) 北天山中段动态重力变化特征基本反映了该地区动力构造运动的外部环境。该区域重力变化具有明显的分区特征,这与该地区构造分布基本一致,山体和盆地之间的重力变化有显著差异。

(3) 北天山中段重力场时空变化特征与地壳物质密度变化结构基本一致,较好地反映了该地区地壳物质运移的基本过程。地壳内部物质发生迁移,致使地壳内部密度随之发生变化,使得该处重力和地面点的空间位置发生变化。

(4) 重力剖面图像能较好地分析北天山局部地区重力变化特征,为详细研究跨断层剖面提供更可靠的科学依据。

参考文献(References)

- [1] 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,2006,28(2):205-212.
SHEN Jun, CHEN Jian-bo, WANG Cui, et al. The Seismogenic Tectonics of the $M_s 6.8$ Bachu—Jiashi, Xinjiang, Earthquake in Feb. 24, 2003 [J]. Seismology and Geology, 2006, 28(2): 205-212. (in Chinese)
- [2] 高国英,温和平.帕米尔东北侧现代构造应力场与地震活动特征研究[J].中国地震,2000,16(2):176-184.
GAO Guo-ying, WEN He-ping. Recent Tectonic Stress Field and Seismicity of Northeast Pamir [J]. Earthquake Research in

- China, 2000, 16(2): 176-184. (in Chinese)
- [3] 李杰, 方伟, 朱治国, 等. 中部天山地壳运动的 GPS 初步分析[J]. 内陆地震, 2004, 20(3): 239-244.
LI Jie, FANG Wei, ZHU Zhi-guo, et al. Preliminary Analysis on Crust Action by GPS in Middle Tianshan Mountain[J]. Inland Earthquake, 2004, 20(3): 239-244. (in Chinese)
- [4] 赵翠萍, 夏爱国, 郑斯华, 等. 新疆北天山中东段地区震源参数研究[J]. 中国地震, 2005, 21(3): 61-69.
ZHAO Cui-ping, XIA Ai-guo, ZHEN Si-hua, et al. Study on Source Parameters of Earthquakes Occurred on the Middle-East Area of Northern Tianshan in Xinjiang[J]. Earthquake Research in China, 2005, 21(3): 61-69. (in Chinese)
- [5] 姜枚, 李海鸥, 王亚军, 等. 青藏高原隆升对新疆天山山脉地壳-上地幔构造的影响[J]. 地学前缘, 2006, 13(5): 401-407.
JIANG Mei, LI Hai-ou, WANG Ya-jun, et al. The Effect of Qinghai-Tibet Plateau Uplift on The Structure of Crust and Upper Mantle beneath the Tianshan Mountains in Xinjiang[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(5): 401-407. (in Chinese)
- [6] 高国英, 李莹甄, 聂晓红, 等. 2006 年 11 月 23 日乌苏 5.1 级地震后北天山地震形势分析[J]. 内陆地震, 2007, 21(2): 113-118.
GAO Guo-ying, LI Ying-zhen, NIE Xiao-hong, et al. Earthquake Situation Analysis in Northern Tianshan Region after Wusu Earthquake of $M_s 5.1$, on Nov. 23, 2006[J]. Inland Earthquake, 2007, 21(2): 113-118. (in Chinese)
- [7] 龙海英, 高国英, 聂晓红, 等. 北天山中东段中小地震震源机制解及应力场反演[J]. 地震, 2008, 28(1): 93-98.
LONG Hai-ying, GAO Guo-ying, NIE Xiao-hong, et al. The Focal Mechanism Solution and Stress Field Inversion of Small and Moderate Earthquakes Along middle-eastern Part of Northern Tianshan Region[J]. Earthquake, 2008, 28(1): 93-98. (in Chinese)
- [8] 李志海, 黄瑜, 曲延军, 等. 新疆北天山 2 次 5 级地震的尾波衰减系数研究[J]. 内陆地震, 2009, 23(3): 337-344.
LI Zhi-hai, HUANG Yu, QU Yan-jun, et al. Study on Attenuation Coefficient of Coda Waves for Two $M_s 5.0$ Earthquakes in Northern Tianshan Mountain, Xinjiang[J]. Inland Earthquake, 2009, 23(3): 337-344. (in Chinese)
- [9] 刘代芹, 朱治国, 王晓强, 等. 新疆天山中部重力场时空变化特征研究[J]. 地震研究, 2012, 35(4): 506-513.
LIU Dai-qin, ZHU Zhi-guo, WANG Xiao-qiang, et al. Research on the Temporal-Spatial Variation Characteristic of Gravity Field in the Central Tianshan, Xinjiang[J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(4): 506-513. (in Chinese)
- [10] 祝意青, 梁伟锋, 湛飞并, 等. 中国大陆重力场动态变化研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 804-813.
ZHU Yi-ying, LIANG Wei-feng, F Benjamin Zhan, et al. Study on Dynamic Change of Gravity Field in China Continent[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(3): 804-813. (in Chinese)
- [11] 陈石, 祝意青, 蒋长胜, 等. 新疆于田 $M_s 7.3$ 地震前重力场变化的质源体特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2011, 32(5): 1-8.
CHEN Shi, ZHU Yi-qing, JIANG Chang-sheng, et al. Estimate the Characteristic of Density Anomaly Source of Gravity Variation Before $M_s 7.3$ Earthquake, Yutian, Xinjiang[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2011, 32(5): 1-8. (in Chinese)
- [12] 刘代芹, 李杰, 王晓强, 等. 新疆及邻近地区重力场变化特征研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(2): 331-337.
LIU Dai-qin, LI Jie, WANG Xiao-qiang, et al. Variation Characteristics of a Recent Gravity Field in Xinjiang and Its Adjacent Region[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(2): 331-337. (in Chinese)
- [13] 刘代芹, 王晓强, 李杰, 等. 新疆南天山地区重力场及其动态演化特征[J]. 西北地震学报, 2009, 31(2): 174-178.
LIU Dai-qin, WANG Xiao-qiang, LI Jie, et al. The Dynamic Evolution Features of Gravity Field in Southern Tianshan Area, Xinjiang[J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31(2): 174-178. (in Chinese)