

doi:10.3799/dqkx.2014.166

# 新疆于田及周边地区地震活动性与重力异常特征

徐伟民, 陈石, 石磊

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

**摘要:** 基于最新重力场模型对2014年于田 $M_s$ 7.3地震震区的重力异常特征进行分析,并应用Crust1.0地壳模型计算得到震区的深部构造形态,结果显示:震中位于地壳厚度陡变带上.同2008年于田 $M_s$ 7.3地震相比,震中虽位于不同位置,但发震机制均与深部地壳结构变化密切相关.统计研究区内历史地震活动性与重力异常之间的关系,发现震中的自由空气异常与地形存在明显的线性相关性,而布格异常和均衡异常的结果则明显不同.进一步地分别计算不同重力异常的水平总梯度和线性信号,结果表明:重力异常梯度量与地形的相关特性更明显.研究表明: $M_s$ 7.0以上大震活动与重力异常之间具有明显的统计特性学,这可能与重力异常反映的深部结构和壳内质量分布的不均匀有关.

**关键词:** 于田地震;地震活动性;重力异常;地壳模型;统计特性;天然地震.

中图分类号: P315.72

文章编号: 1000-2383(2014)12-1831-11

收稿日期: 2014-04-04

## Seismic Activity and Gravity Anomaly Characteristics of Yutian in Xinjiang and Surrounding Regions

Xu Weimin, Chen Shi, Shi Lei

*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

**Abstract:** The latest model of the gravitational field was used in the analysis of the gravity anomaly characteristics in the Yutian seismic zone and surrounding regions. The layered crustal structure model (Crust1.0) has been applied to obtain the deep tectonic structure around the seismic zone. This epicenter occurred in the steep variations of the crustal thickness. Contrast to the  $M_s$ 7.3 earthquake in 2008 in this region, although these two epicenter were located in different 3-D spaces, they are closely related to the changes in the deep crustal structures. Besides, based on the statistical analysis of the relationship between the seismicity of historical earthquakes ( $M_s \geq 5.0$ ) and three different gravity anomalies, we found that the free-air gravity anomalies in the seismic zone are in an obvious linear correlation to the topography, while the Bouguer anomaly and isostatic anomaly are distinctly different with the topography. In addition, the total horizontal gradient (HGM) of the anomalies were calculated and the analytical signal (ASL) was plotted, which suggest that the gradient values are more distinctly correlated. The results show that a significant statistical characteristic exists between the activities of the strong earthquakes ( $M_s \geq 7.0$ ) and the gravity anomalies, which may be related to the mass uneven distribution of the deep structure which caused the gravity anomaly.

**Key words:** Yutian earthquake; Seismic activity; gravity anomaly; crust model; statistical characteristics; earthquake.

## 0 引言

2014年2月12日新疆于田发生 $M_s$ 7.3地震(82.5°E, 36.1°N),震源深度12.5 km,矩震级为

$M_w$ 6.9(张勇等,2014).地震发震位置地处高原山区,震中附近地区人烟稀少因此没有人员伤亡.该次地震震中区域近年来曾先后发生2008年 $M_s$ 7.3地震、2011年 $M_s$ 5.5地震、2012年 $M_s$ 6.2地震和2104年 $M_s$ 5.4地震等.本次地震震源机制是以左旋走滑

**基金项目:** 科技部国际合作重点项目(No.2011DFB20210);国家地震科技支撑计划项目(No.2012BAK19B01-05);国家自然科学基金青年基金项目(No.41104046);中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项(Nos.DQJB12B20,DQJB12C03,DQJB12B14);四川省芦山“4·20”7.0级强烈地震科学考察(No.1301001).

**作者简介:** 徐伟民(1987-),男,研究实习员,硕士,主要从事区域重力场变化、连续重力资料分析、绝对重力监测研究等工作.

E-mail: xuweimin@cea-igp.ac.cn

为主并具有正倾滑分量的地震,发震断裂位置在阿尔金左旋逆冲断裂带的西段.与 2008 年于田  $M_s7.3$  地震相比,相同的是两次地震都发生在巴彦喀拉活动地块西边界(万永革等,2010;高翔和邓启东,2013;沈军等,2013;杨兴悦等,2013);不同的是 2008 年于田  $M_s7.3$  地震发生在 NS 向挤压构造应力背景下略带走滑分量的郭扎错拉张破裂带(李志海等,2009).

2014 于田  $M_s7.3$  地震,震后调查结果表明:地震后地表没有发生明显破裂,主震发生后的破裂集中于震中下方;根据震后余震定位显示,地震破裂面主要沿着北西方向滑动.从 2008 年和 2014 年两次地震震中位置的 Moho 界面深度分布特征看,地震震中都处于青藏高原向北推挤与塔里木盆地相连的盆山交界处的高梯度带上,但 2008 年的  $M_s7.3$  震源深度较深(徐锡伟等,2011).于田地区 2008 年和 2014 年两次  $M_s7.3$  地震发震间隔时间较短,所处的构造位置相近,因此,本文从 2014 于田  $M_s7.3$  地震震中及周边地区的地球物理场特征入手,研究该地区深部构造因素及重力异常特点.此研究对揭示该区强震活动规律及发震构造区的重力异常场特征具有重要意义.

地震是地球构造运动的一种表现形式,正是由于构造运动的不断演化才形成现今地表的山川盆地及错综复杂的断裂系统.在地质历史时间尺度上各个时期的构造运动均会在地壳内留下变形信息.构造运动不仅会引起地壳内各个界面之间的变形,同时也会在一定范围内导致深部物质分布的不均匀,而物质的不均匀分布引起的异常特征会包含在地表观测获得的重力异常信号中,故地表观测到的布格重力异常常被学者看作是地壳变形的“化石”记录(王谦身,2003).因此,从重力异常入手,研究壳内形变场特征和物质分布不均匀特性,并结合区域构造活动特性,有助于揭示一个区域的形变场特征及孕震规律特点.本文研究区内的阿尔金断裂和巴颜喀拉块体均是备受学者关注的构造运动单元(许志琴等,1999;崔军文等,2002;李秋生等,2003;任收麦等,2003;陈长云等,2013;高翔和邓启东,2013),从重力异常特征角度去分析该区域的构造运动具有重大意义(耿涛等,2008).

根据发震机制,一般可以将地震分为板内地震和板间地震两种(Liu *et al.*,2011a).现有研究表明,对于环太平洋地震带的板间地震而言,统计在俯冲带附近的地形与自由空气重力异常之间的相关关系

发现,Song and Simons(2003)统计研究俯冲带地震结果表明,强震通常集中发生在地形和自由空气重力异常较小的地区,而对于地形和自由空气重力异常都呈现高值的地区几乎不发生,或者说这些地方是耐震的,因此对于俯冲带附近的板间地震而言,其孕震特点就可以通过自由空气重力异常去进一步揭示其原理.板内地震相比板间地震而言,不仅发震机理复杂,而且复发周期和发震震中的空间分布规律更不易进行预测(Stein *et al.*,2009;Liu *et al.*,2011a,2011b),从重力异常解释地壳变形与物质分布不均匀特性入手,通过统计方法分析震中位置的重力场特征,无疑对进一步认识孕震区的构造背景等科学问题具有推动作用.

本文基于以上研究思路,以最新的 EGM2008 重力模型、V16.1 高程模型和 Crust1.0 地壳模型为基础,计算研究区域的布格重力异常和 Airy-Heiskanen 均衡重力异常,并通过横跨震中两条剖面(2014 于田  $M_s7.3$  地震)研究剖面构造特征,并进一步统计震中位置的地形和重力异常场相关特性,认识发震区的地球物理场特征,进一步揭示青藏高原北部孕震特点.

## 1 研究区构造背景与重力异常特征

本文的研究区域选择在  $72^\circ\text{E}\sim 92^\circ\text{E}$ ,  $28^\circ\text{N}\sim 46^\circ\text{N}$  范围内,大致以 2014 年新疆于田  $M_s7.3$  地震震中为中心,包括了青藏高原北缘和塔里木盆地及天山等构造运动活跃的地区(图 1).研究依据最新的 EGM2008 全球重力数据模型(Sandwell *et al.*,1997,2009,2013),该数据的网格分辨率为  $1'$ .本文在此数据基础(图 1b)上,首先进行坐标投影变换,采用 Lambert 投影,投影中央经度( $82.5^\circ\text{E}$ ,  $36.1^\circ\text{N}$ )选为于田  $M_s7.3$  地震震中位置.再采用 Fa2boug 程序计算了该区的布格重力异常和 Airy 均衡重力异常(Fernández *et al.*,2008),其中地形数据来源于 Topex 网站与自由空气重力异常相匹配的最新 V16.1 版本数据(Smith *et al.*,1997),本文地形校正后得到的布格重力异常输出网格精度统一为 4 km.其中,对计算得到的布格重力异常和 Airy 均衡重力异常,本文采用 Gauss 低通滤波器进行区域异常和局部异常的分离(Li and Oldenburg,1998),滤波器参数空间尺度为 50 km,分离得到了如图 2 所示的区域重力异常场.

研究范围内覆盖的活动构造地块,包括了青藏

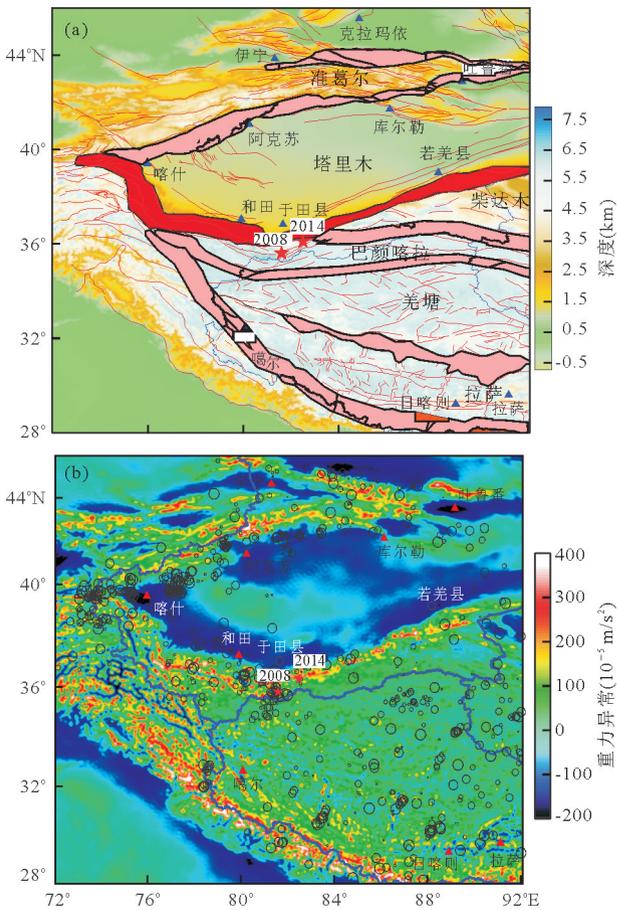


图 1 新疆于田构造背景和重力异常

Fig.1 The tectonic setting and gravity anomaly of Yutian in Xinjiang

a. 研究区地形、断裂分布及活动地块边界; b. 研究区主要地震活动 (1970 年以来  $M_s 5.0$  以上地震) 与自由空气重力异常。a 中红色实线为活动断裂分布, 蓝色实线为行政区划边界, 红色和黄色分别为一级和二级活动地块; b 中地震震中位置用黑色圆圈表示其大小与圆圈直径正相关, 于田两次  $M_s 7.3$  地震用红色五角星表示。图 1a 中的地形数据来源于 EGM2008 模型; b 中的自由空气重力异常数据来源于 Topex 网站最新 V22.1 版本数据, 并经过了 Gauss 50 km 低通滤波, 重力单位  $mGal = 10^{-5} m/s^2$

和西域 2 个一级活动地块及拉萨、羌塘、巴颜喀拉、柴达木、塔里木和准葛尔 6 个二级活动地块(图 1a)。这些活动地块的划分主要以晚第四纪到现今的构造活动性为依据(张培震等, 2003), 其边界区域位置囊括了中国大陆 1970 年以来全部  $M_s 8$  以上地震和 80% 的  $M_s 7$  地震分布(张国民和张培震, 1999)。

从整个研究区的构造活动动力学背景看, 该区的自由空气重力异常与地表变形存在高度的相关性(图 1), 该地区地表变形的力源主要是自新生代以来印度板块的持续向北推挤作用, 引起青藏高原地表的不断隆起, 并伴随着岩石圈上地幔物质的耦合

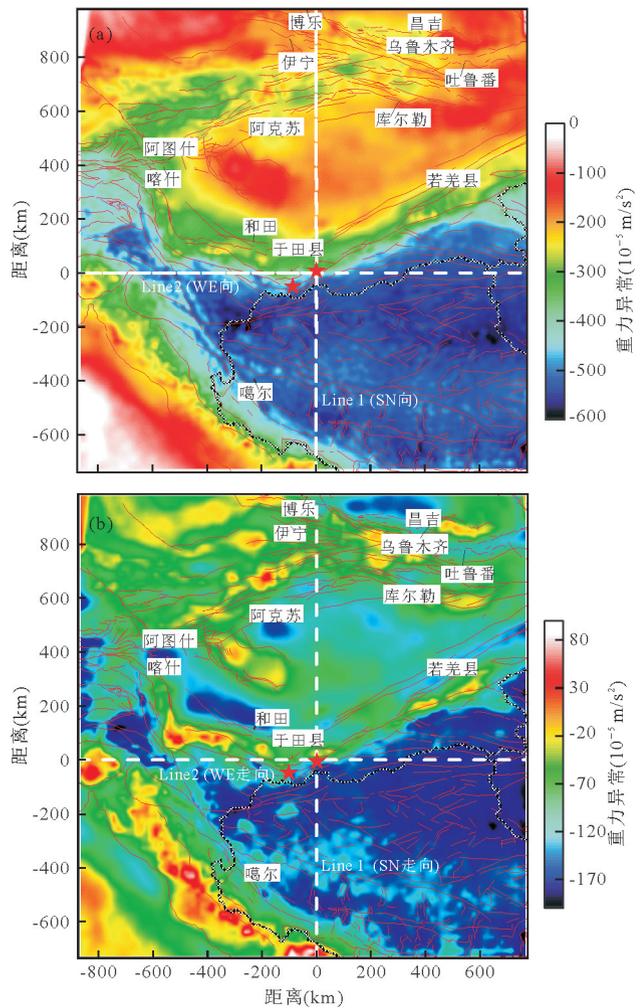


图 2 研究区布格重力异常与均衡重力异常特征

Fig.2 The Bouger gravity and isostasy gravity anomaly of the research region

a. 研究区布格重力异常; b. 研究区均衡重力异常。图中红色实线为活动断裂分布, 本次于田两次  $M_s 7.3$  地震用红色五角星表示; 图 a 和 b 中的重力异常网格精度为 4 km, 重力单位  $mGal = 10^{-5} m/s^2$ , 并统一为 Gauss 50 km 低通滤波结果, 坐标采用 Lambert 平面投影, 中央经纬度分别为  $82.5^\circ, 36.1^\circ$ ; 均衡重力异常计算中选取的地壳平均深度为 30 km, 壳幔密度差  $0.45 g/m^3$

变形并向北运移, 积累了大量的剩余质量, 但同时由于受到刚性塔里木地块的阻挡, 在青藏地块和西域地块的边界地区形成大面积的地表隆起和山前盆地凹陷带, 岩石圈对于这些构造加载的表征即为自由空气重力异常上对应的一连串连续的正负异常梯级带(图 1b)。图 1b 显示的自由空气重力异常梯级带, 与青藏和西域两大一级地块边界带位置一致。因此, 从自由空气重力异常上特征看, 重力异常可以看作是一种岩石圈在构造活动作用下的“输出信号”。此外, 从图 2 所示的布格重力异常和均衡重力

表 1 研究区 1970 年以来  $M_s 7.0$  以上历史地震活动Table 1 The historical seismicity exceed  $M_s 7.0$  in related region after 1970

编号	发震时间和名称	构造位置与震源机制	位置(经/纬)	深度(km)	震级
1	1985 年 8 月 23 日乌恰地震	卡兹克阿尔特断裂带/右旋	39.53°E/75.32°N	18	7.4
2	1996 年 11 月 19 日和田地震	喀喇昆仑断裂带/右旋走滑	35.43°E/78.35°N	16	7.1
3	1997 年 11 月 18 日玛尼地震	茶卡—若拉错断裂/走滑	35.20°E/87.30°N	10	7.4
4	2001 年 11 月 4 日昆仑山地震	东昆仑断裂带/左旋滑动	35.97°E/90.59°E	10	8.1
5	2008 年 3 月 21 日于田地震	郭扎错断裂/拉张型	35.80°E/81.43°N	26	7.3
6	2014 年 4 月 12 日于田地震	阿尔金断裂西段/走滑型	36.10°E/82.50°N	12	7.3

异常可以得出,在大区域范围内其地球物理意义分别对应深部构造变形与壳内剩余不均匀变形.其中布格重力异常整体为负异常,变化范围在  $-600 \times 10^{-5} \sim 0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  之间,均衡重力异常变化范围在  $-180 \times 10^{-5} \sim 80 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  之间.

研究区域内 1970 年以来  $M_s 7.0$  以上历史地震记录共 6 次(表 1),其中,2008 年新疆于田  $M_s 7.3$  地震发震位置位于塔里木盆地南缘,是西昆仑地震带和阿尔金地震带交汇处,震源机制显示为该地震以拉张为主兼具走滑分量.在其周围的历史  $M_s 7.0$  以上地震有 3 次,分别是 1996 年和田喀喇昆仑山口西  $M_s 7.1$  地震和 1924 年和田—民丰 2 次  $M_s 7.3$  地震,笔者并对本次地震附近地区自 1970 年以来  $M_s 7.0$  以上的地震事件进行统计,地震参数如表 1.本次地震与前一次  $M_s 7.0$  以上地震的发震时间间隔仅 6 年,复发周期较短,这说明该区构造活动已经处于活跃期.为了进一步研究本次地震发震位置与深部构造等的关系,笔者以本次地震震中为中心,分别设计了 SN(L1)和 EW(L2)两个方向的剖面,位置如图 2 中白色虚线所示.关于剖面周边地震活动特点和与深部构造的问题,将在下一节进行详细讨论.

## 2 跨震中剖面的重力异常与深部构造

本文通过计算获得研究区域的布格重力异常模型和均衡重力异常模型后,以 2014 年于田  $M_s 7.3$  地震震中为中心,选取了跨震中 SN 和 EW 方向的 L1 和 L2 位置的两个剖面(图 2),同时标出两条剖面位置两侧约 60 km 范围内、震级大于  $M_s 5.0$  的历史地震的震中位置,计算多种重力异常及其空间导数结果并将其投影到相应的剖面之上,详细结果如图 3 和 4 所示.在图 3 和图 4 中,使用的深部构造界面数据来源于最新的全球 Crust 1.0 地壳  $1^\circ \times 1^\circ$  精度分层模型数据(Laske *et al.*, 2013),并获得了包括沉积盆地基底和上、中、下地壳的底界起伏等多项

深部结构分层数据.

图 3 所示的为南北向 L1 综合剖面图,其中在塔里木盆地两侧分别受到天山和昆仑山的构造加载,对应明显的自由空气重力异常突变带,表现为以塔里木盆地低异常和两侧的高值异常陡变带,这表明在盆地两侧集中了较大的介质变形或剩余质量分布.首先从图 3a 所示的 3 种重力异常曲线形态可以看出,自由空气重力异常(FGA)与地表地形的起伏变化具有一定线性相关特性;布格重力异常(BGA)的起伏与 Moho 面起伏较一致,更多反映了深部构造界面的起伏性趋势变化;均衡重力异常(IGA)的变化特征不同于前两者,从地球物理意义上讲,更趋向于反映地壳内部介质的密度变化或变形特征.

在图 3 所示的综合剖面上,从 F2 和 F3 断裂位置对应于两次  $M_s 7.3$  地震震中位置的异常形态看,2014 年的于田  $M_s 7.3$  地震震中两侧的 FGA、BGA 和 IGA 3 项重力异常都存在明显起伏,而 2008 年的于田  $M_s 7.3$  地震震中处地表各项重力异常并不明显.同时从两次地震的位置看,都对应深部 Moho 面起伏变形的过渡区域.此外,在塔里木盆地北边缘,天山南缘的 F5 断裂下方地震都垂直集中分布在上中地壳内,地表对应大幅度 FGA 重力异常带与小幅度变化的 BGA 和 IGA 重力异常带.

在图 4 中给出了跨震中位置从西至东方向的综合信息剖面(L2),从图 4a 中 3 条重力异常起伏上看,异常幅度明显小于 L1 剖面,在图 4b 所示地震中的位置,主要集中在 F2 和 F3 断裂之间,而 F2 和 F3 两条断裂所处位置两侧的 FGA、BGA 和 IGA 3 项重力异常均显示有明显的变化.

从 2008 年和 2014 年两次于田  $M_s 7.3$  地震的震源深度看,2008 年地震震源位于上地壳底部界面位置,而 2014 年地震震源位于上地壳和中地壳之间.从图 3 和图 4 的两次地震对应地表的各项重力异常值变化上看,特点各不相同.从前人研究结果上看,两次地震的震源机制也不相同.那么,地震震中位置

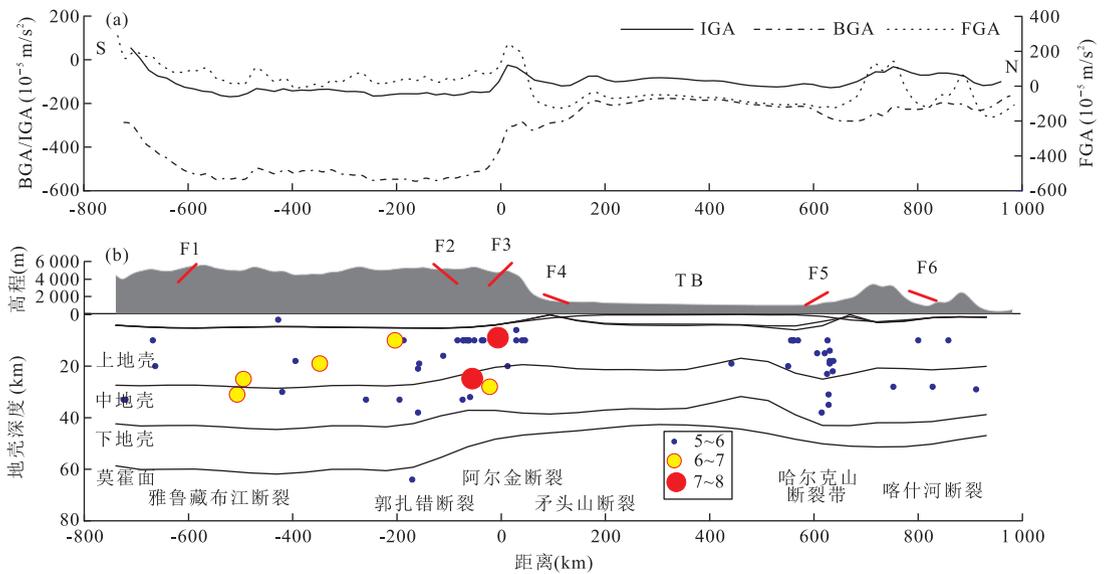


图 3 跨震中南北向剖面地形起伏、深部构造和重力异常变化数据

Fig.3 The topography, deep structure and gravity anomaly data of the south-north profile through the epicenter of Yutian in Xinjiang in 2014

a.剖面位置的重力异常曲线;b.剖面位置深部构造界面、地震活动及地形起伏,FGA表示自由空气重力异常 BGA 布格重力异常 IGA 均衡重力异常,重力单位  $mGal=10^{-5} m/s^2$ ;TB塔里木盆地;F1雅鲁藏布江断裂 F2 郭扎错断裂 2008 年于田 M7.3 地震发震断裂 F3 阿尔金断裂 2014 年于田 M7.3 断裂发震断裂 F4 矛头山断裂 F5 哈尔克山断裂带 F6 喀什河断裂以上符号和说明与下图相同;图中地形数据来源于图 1 相同,地震目录由中国地震台网提供,其中部分地震没有震源深度数据统一设置为 10 km

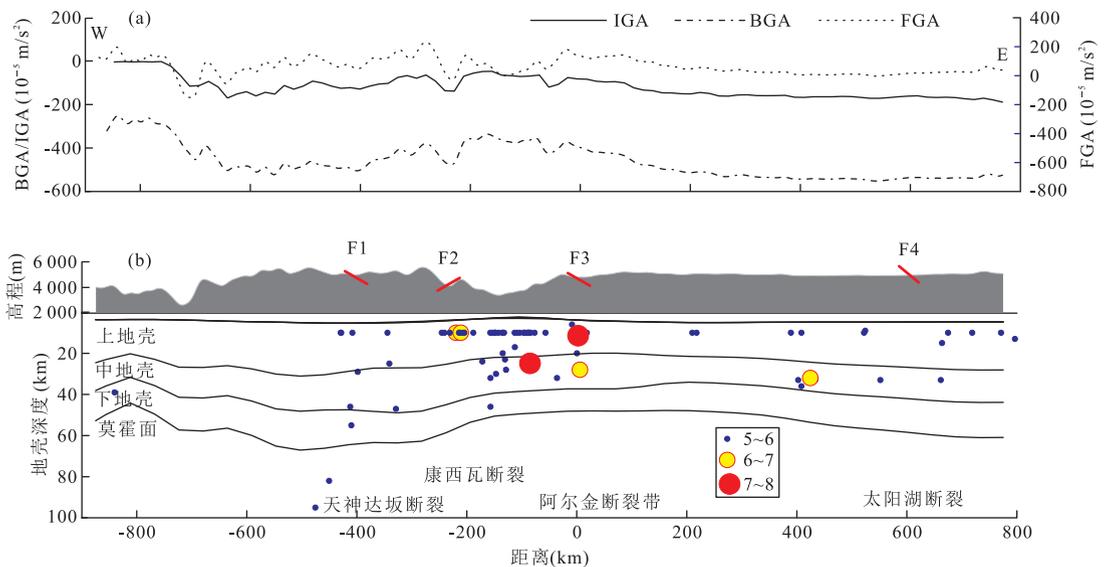


图 4 跨震中西东向剖面地形起伏、深部构造和重力异常变化数据

Fig.4 The topography, deep structure and gravity anomaly data of the west-east profile through the epicenter of Yutian in Xinjiang in 2014

a.剖面位置的重力异常曲线;b.剖面位置深部构造界面、地震活动及地形起伏.图中 FGA、BGA 和 IGA 符号含义与图 3 相同;F1.天神达坂断裂;F2.康西瓦断裂;F3.阿尔金断裂;F4.太阳湖断裂;图中地形数据来源于图 1 相同,地震目录由中国地震台网提供

分布与地形起伏和重力异常变化曲线之间是否存在一定相关关系呢?笔者下一节将通过统计方法进一步研究这个问题.

### 3 研究区地震活动与重力异常统计分析

前文通过针对 L1 和 L2 两个综合剖面的地球

物理场和深部构造界面起伏与地震震中之间关系特征对比研究表明:重力异常不仅与不同壳内界面变形之间存在一定相关关系,而且地震震中分布可能与这些不同深度范围内的壳内变形密切相关。那么,是否可以从研究板间地震孕育行为规律的思路和方法入手(Song and Simons, 2003),来研究活动地块之间不同震源机制作用下的地震活动规律呢?基于此笔者分别针对 FGA、BGA 和 IGA 三项重力异常和其两项空间导数作为指标,通过统计分析方法来研究地壳形变、重力异常和地震活动分布三者之间的关系。

一般认为,重力异常对于反映构造界面起伏或水平向的物性差异较敏感,通常异常垂直于构造走向方向对应重力场变化的最大梯度位置,因此,笔者可以通过对异常进行空间求导的方式定性研究重力异常场与构造分布或者密度横向变化之间的关系。通常使用异常水平总梯度图(HGM)和异常解析信号图(ASL),去识别水平向的构造变化和一些潜在的隐伏断裂位置。

水平总梯度图的计算方法是分别对重力异常在水平的 X 和 Y 方向求一阶导数,然后采用公式(1)进行计算(王万银, 2010)。计算结果可以反应水平分布的线性构造最佳空间位置特征。

$$g_{\text{HGM}}(x, y, z) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta g(x, y, z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g(x, y, z)}{\partial y}\right)^2}, \quad (1)$$

式(1)中:  $\Delta g(x, y, z)$  为空间点  $P(x, y, z)$  的重力异常,单位为  $10^{-5} \text{ m/s}^2$  公式(1)的详细表达可参考王万银(2010)的研究。解析信号图的计算方法是分别对 X、Y 和 Z 3 个方向求一阶导数,然后采用公式(2)进行计算(王万银, 2010)。计算通常在频率域进行,相比水平总梯度,解析信号包含了垂直方向的梯度信息,更可以体现重力异常的空间变化特点。

$$g_{\text{ASL}}(x, y, z) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta g(x, y, z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g(x, y, z)}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g(x, y, z)}{\partial z}\right)^2}, \quad (2)$$

式(2)中:  $\Delta g(x, y, z)$  为空间点  $P(x, y, z)$  的重力异常,单位为  $10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。在本文研究中,笔者分别对经过 Gauss 滤波后的剩余重力异常求取了 HGM 和 ASL 结果,如图 5~7 所示。

从图 5a~5c 所示的 3 个统计结果看,图 5a 中  $M_s 5.0$  以上地震的震中位置对应的 FGA 重力异常与地形之间总体上存在一定的线性相关关系。但是在该研究区,FGA ( $0 \sim 100 \text{ mGal}$ ) 和地形 ( $4500 \sim$

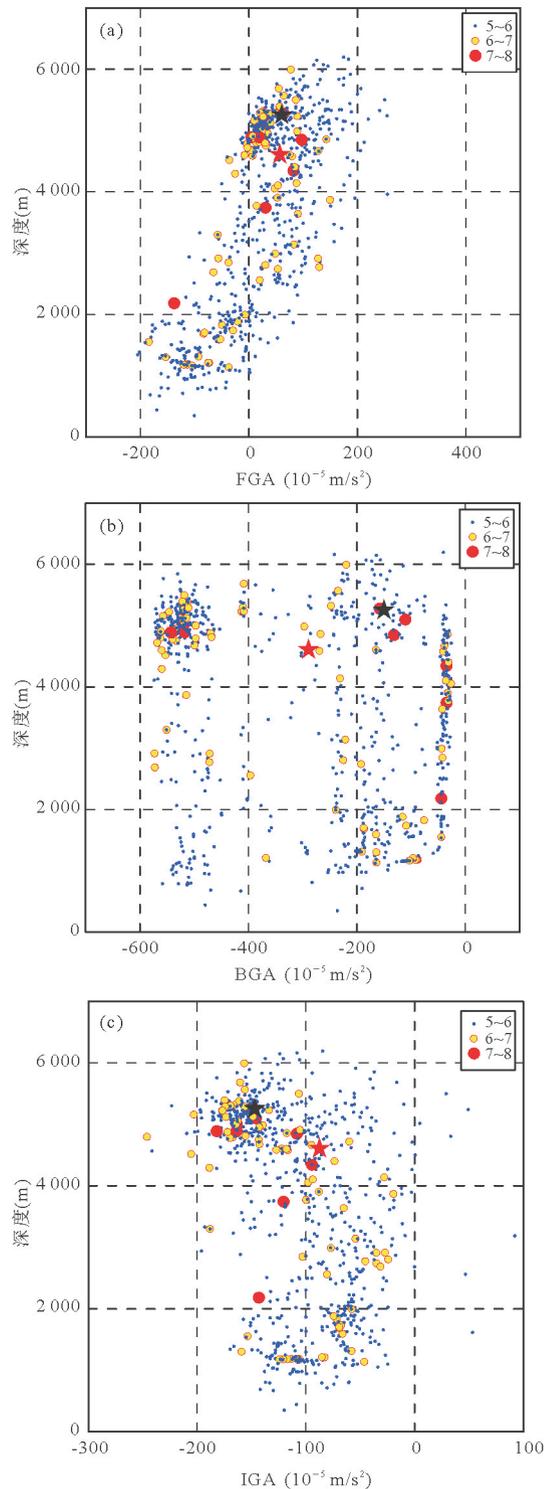


图 5 研究区内地震震中位置的重力异常与地形高程相关关系

Fig.5 The relationship of the gravity anomaly and topography of the epicenter of earthquakes in research region a.自由空气重力异常与高程关系;b.布格重力异常与高程关系;c.均衡重力异常与高程关系。图中地形数据和重力异常数据于图 1 和图 2 中相对应,地震目录由中国地震台网提供,两次于田  $M_s 7.3$  地震分别用五角星表示,其中黑色五角星对应 2008 年地震,红色对应 2014 年地震

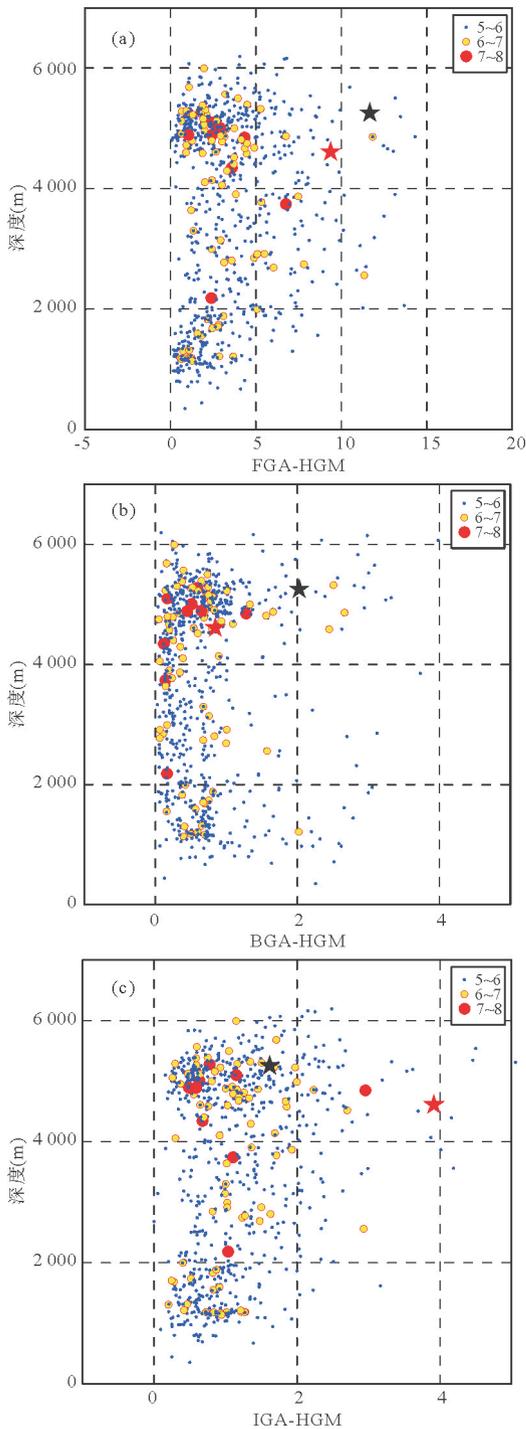


图 6 研究区内地震震中位置的重力异常水平总梯度与地形高程相关关系

Fig.6 The relationship of the gravity anomaly and topography of the epicenter of earthquakes in research region a.自由空气重力异常水平总梯度与高程关系;b.布格重力异常水平总梯度与高程关系;c.均衡重力异常水平总梯度与高程关系.图中各符号和图标含义与图 5 一致,其中重力梯度单位为  $10^{-5}/s^2$

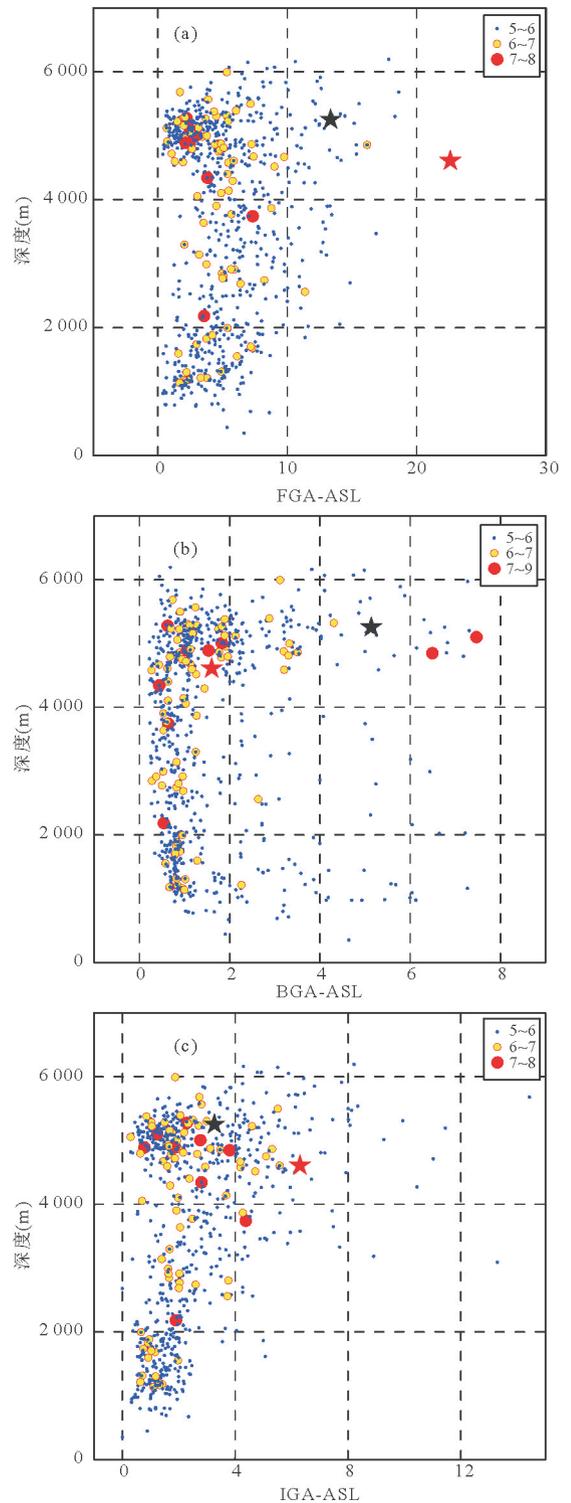


图 7 研究区内地震震中位置的重力解析信号与地形高程相关关系

Fig.7 The relationship of the gravity anomaly and topography of the epicenter of earthquakes in research region a.自由空气重力异常解析信号与高程关系;b.布格重力异常解析信号与高程关系;c.均衡重力异常解析信号与高程关系.图中各符号和图标含义与图 5 一致,其中重力梯度单位为  $10^{-5}/s^2$

5 500 m)位置集中了更多的地震活动,并对应更多能量释放,两次于田  $M_s 7.3$  地震震中也位于这个区

域,而图 5b 所示的 BGA 重力异常与地形之间的分布呈四边形,如前所述 BGA 异常与地形相关性不强,而与深部界面起伏关系更明显.如果以地震震中位置的聚集程度为指标进行统计,在 BGA 异常为  $-500$  mGal 和地形为  $5\ 000$  m 为中心,地震活动最为频繁,另外在 BGA 异常为  $-40$  mGal 周边也聚集大量地震活动.而相比之下,BGA 异常为  $-200\sim-400$  mGal 之间范围内,地震活动性明显低于其他地区.但此次地震恰发生在该范围内.图 5c 所示的 IGA 重力异常与地形之间关系与图 5a 和图 5b 呈现的相关关系都不相同,大部分地震活动都集中在 IGA 为  $-200\sim-100$  mGal 之间,在大于  $0$  mGal 和小于  $-200$  mGal 的位置几乎没有发生过地震.从图 5a~5c 3 个结果分析,本文认为图 5c 的均衡异常统计结果显示的地震震中聚类结果更好,这说明在这些活动地块周边分布的浅部中强地震活动,与地壳内部不均匀质量分布关系性更密切.

从图 3 和 4 所示的综合剖面特征上看,可知在重力异常变化梯度带位置,构造活动性通常较强,那么重力异常梯度信息是否能进一步揭示那些地方是易发震或耐震的呢通过图 6 和图 7 结果来研究这个问题.

图 6 给出了基于公式(1)计算得到的研究区内地震震中位置的重力异常水平总梯度(HGM)与地形高程相关关系.图 6a 所示的 FGA-HGM 地震震中分布聚类结果明显与图 5a 的线性分布不同,对应  $0\sim 5/s^2$  的梯度值区间聚集更多地震,表 1 列出的历史上 6 次  $M_s 7.0$  以上(1970 年以来)地震都在这个区间分布.图 6b 所示的 BGA-HGM 结果显示,地震震中多聚类于  $0\sim 1$   $s^2$  的梯度值区间,历史上 7 次  $M_s 7.0$  以上地震(含 1924 年两次和田地震)都在这个区间分布,而且 80% 以上的  $M_s 5.0\sim 7.0$  地震也分布在此区间内.图 6c 所示的 IGA-HGM 结果没有明显好于图 5c,但明显不同的是,地震震中更集中于梯度值在  $0\sim 2/s^2$  范围内的低值区间.因此,从图 6 的异常水平总梯度结果与图 5 结果对比看,HGM 求空间导数后,明显聚类程度得到改善的是布格重力异常结果.需要说明的是,3 个图中对应的这两次于田  $M_s 7.3$  地震震中位置始终没有聚类到较为一致的点位.

图 7 给出了基于公式(2)计算得到的研究区内地震震中位置的重力异常解析信号(ASL)与地形高程相关关系,ASL 梯度异常与 HGM 梯度异常最大的不同在于:ASL 信号中包含了异常的垂向梯度信

息,这就意味着对不同深度的异常更敏感.图 7a 所示的 FGA-ASL 地震震中分布聚类结果表明,大多数地震震中集中在梯度值为  $0\sim 10/s^2$  范围内,但较特殊的是 2014 年的于田  $M_s 7.3$  地震震中位置竟然在梯度值为 22 的高值区.图 7b 所示的 BGA-ASL 震中聚类分布结果,相比图 6b 无明显改善,聚类结果呈发散趋势.图 7c 所示的 IGA-ASL 结果,相比图 6c 也无明显改善.

## 4 讨论与结论

本文基于目前最高分辨率的 EGM2008 重力模型,以 2008 年和 2014 年两次于田  $M_s 7.3$  地震的震中辐射至周边构造活跃的活动块体及构造单元为研究区域,计算该地区的布格重力异常和均衡异常,结合地区地形、地震活动性及构造活动特征分析和研究对应的重力异常特征.同时,设计两条正交穿过 2014 年于田  $M_s 7.3$  地震震中位置的剖面,结合地壳分层模型,统计历史地震震中分布,结合地形、构造断裂分布分别研究自由空气重力异常(FGA)、布格重力异常(BGA)及均衡重力异常(IGA)的异常特征和构造运动的关系.为进一步地探讨区域重力异常和构造运动的关系,从重力异常梯度信息去揭示二者的相关性,分别对比研究了重力异常信号的水平总梯度(HGM)及异常解析信号(ASL)和区域构造运动特征的关系.

本文研究结果表明:活动地块边界区域位置重力场具有显著的高梯度、不均匀和变化形式复杂多样等特点.通过 Crust1.0 模型揭示的深部构造变形看,这些变形涉及上中下地壳不同深度范围,而地震孕震区的位置不但与深部构造相关,而且也与壳内质量分布的不均匀密切相关.通过对历史大震巨灾后的思考和研究,可知地震的孕育和发生不但受到区域构造控制,而且受到十分复杂的深部动力学过程影响.如果将重力异常看成是地壳或岩石圈对地表载荷的变形响应,那么地形正是在地表的变形表达.因此,联合已有的区域重力背景场和地表高程等信息,结合区域地震活动性、活动块体分布、地壳分层结构模型等构造运动特征,就有可能揭示一个区域的地震孕震规律,基于这个思路,本文得出以下几点结论:

(1)地震震中位置的自由空气重力异常(FGA)与地形之间关系,对于板内地震孕育和发生的指示作用不明显,这与基于板间地震的研究结果不同

(Song and Simons, 2003),这可能与板内地震的成因机制多样和大陆地壳结构及动力学过程复杂有关.进一步揭示地震震中位置重力异常信号和地形之间的关系,需要对异常梯度信号展开研究.

(2)本文研究研究区地震震中位置的重力异常(FGA、BGA 和 IGA)和地形之间的统计关系表明,在本文的研究尺度上,地震震中聚类程度通常会集中于几个特征值范围周围,而且在对应的水平总梯度的结果上聚类程度更高,但是解析信号结果没有更明显的改善,相比之下指示作用不明显.地震震中位置在不同重力异常信号和地形之间关系中的聚类特征,是值得关注的现象.

(3)从震中位置的聚类结果来看,均衡重力异常(IGA)结果与布格重力异常(BGA)结果相似.但对于  $M_s 7$  以上大震震中分布来说,均衡异常的解析信号(ASL)的聚类程度好于布格异常的解析信号(ASL)结果;但是均衡异常的水平总梯度(HGM)信号结果,聚类指示作用弱于布格异常的水平总梯度(HGM)信号.

(4)针对 2008 年和 2014 年两次于田  $M_s 7.3$  地震的重力异常信息综合分析,两次地震在各个重力异常及空间梯度的震中聚类分布中都没有很好地集中到一起,因此本文认为两次地震的发震位置虽然相近,但是在所处的孕震环境区物理场背景还是存在较大差异.这两次地震活动表明,该区域的多条构造带近年来存在活跃化趋势,至于两次地震之间是否存在一定触发关系,依据本文的研究对象—重力异常场方法,还无法给出进一步解释.

本文采用的研究思路还是主要从地壳变形模型到重力异常特点之间的因果关系入手,统计结果显示其两者特征与地震活动存在一定相关关系,但由于板内地震的复杂性,如果进一步研究,还需要依据地震震源机制进一步分类和对不同运动模式的构造区进行统计.本文的研究结果无疑对板内地震复发模式的孕震行为认识是有启发的,也可以进一步为相关区域的长期震情研判和地震危险区划等工作提供有益的帮助.

致谢:本文在写作过程中,与中国科学院地质与地球物理研究所王谦身教授和新疆地震局刘代芹高工进行了有益的讨论;中国地震局地球物理研究所蒋长胜博士对本文研究思路提出建议;中国地震台网提供地震目录数据;在此一并感谢.

## References

- Chen, C. Y., Ren, J. W., Meng, G. J., et al., 2013. Division, Deformation and Tectonic Implication of Active Blocks in the Eastern Segment of Bayan Har Block. *Chinese J. Geophys.*, 56(12): 4125–4141 (in Chinese with English abstract).
- Cui, J. W., Zhang, X. W., Li, P. W., 2002. The Altun Fault: Its Geometry, Nature and Mode of Growth. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(6): 509–516 (in Chinese with English abstract).
- Fernández, M., Fulla, J., Zeyen, H., 2008. FA2BOUG—A FORTRAN 90 Code to Compute Bouguer Gravity Anomalies from Gridded Free-Air Anomalies; Application to the Atlantic-Mediterranean Transition Zone. *Computers & Geosciences*, 34(12): 1665–1681. doi: 10.1016/j.cageo.2008.02.018
- Gao, X., Deng, Q. D., 2013. Activity Analysis of Large Earthquakes in Boundary Faults around the Bayankala Faulting Block. *Acta Geologica Sinica*, 87(1): 9–19 (in Chinese with English abstract).
- Geng, T., Tian, Q. N., Yang, H. Q., et al., 2008. Constraints of the Regional Gravitational Field on the Trend and Extension of the Southwestern Part of the Altyn Tagh Fault. *Geology in China*, 35(5): 841–848 (in Chinese with English abstract).
- Laske, G., Masters, G., Ma, Z., et al., 2013. Update on Crust 1.0 A 1-Degree Global Model of Earth's Crust. *Geophys. Res. Abstracts*, 15: 2658.
- Li, Q. S., Peng, S. P., Gao, R., et al., 2003. Seismic Evidence of the Basement Uplift in the Bayan Har Tectonic Belt, Qinghai, and Its Tectonic Significance. *Geological Bulletin of China*, 22(10): 782–788 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Oldenburg, D. W., 1998. Separation of Regional and Residual Magnetic Field Data. *Geophysics*, 63(2): 431–439. doi: 10.1190/1.1444343
- Li, Z. H., Ma, H. S., Qu, Y. J., 2009. Study on Seismogenic Structure and Seismic Activity Characteristics before the Yutian  $M_s 7.3$  Earthquake on March 21, 2008, Xinjiang. *Earthquake Research in China*, 25(2): 199–205 (in Chinese with English abstract).
- Liu, M., Stein, S., Wang, H., 2011a., 2000 Years of Migrating Earthquakes in North China: How Earthquakes in Mid-continents Differ from Those at Plate Boundaries. *Lithos*, 3(2): 128–132. doi: 10.1130/L129.1
- Liu, M., Yang, Y., Li, Q., et al., 2011b. Parallel Finite Element Modeling of Multi-Timescale Faulting and Lithospheric Deformation in the Western US. In: Keller, R.,

- Baru, C., eds., *Cyberinfrastructure for Geosciences*. Cambridge Press, London, 68—94.
- Ren, S.M., Ge, X.H., Liu, Y.J., 2003. Progress in Altyn Fault Belts Research. *Advance in Earth Sciences*, 6(3): 386—391 (in Chinese with English abstract).
- Sandwell, D.T., Garcia, E., Soofi, K., et al., 2013. Toward 1-mGal Accuracy in Global Marine Gravity from CryoSat-2, Envisat, and Jason-1. *The Leading Edge*, 32(8): 892—899. doi:10.1190/tle32080892.1
- Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., 1997. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS 1 Satellite Altimetry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B5): 10039—10054. doi: 10.1029/96JB03223
- Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., 2009. Global Marine Gravity from Retracked Geosat and ERS-1 Altimetry: Ridge Segmentation versus Spreading Rate. *Journal of Geophysical Research*, 114(B1): B01411. doi: 10.1029/2008JB006008
- Shen, J., Song, H.P., Chen, J.B., et al., 2013. Field Investigation on the Near-Fault Damaging Effects of the 2008 Yutian  $M_s$ 7.1 Earthquake in Xinjiang, China. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 85—93 (in Chinese with English abstract).
- Smith, W.H.F., Sandwell, D.T., 1997. Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science*, 277(5334): 1956—1962. doi: 10.1126/science.277.5334.1956
- Stein, S., Liu, M., Calais, E., et al., 2009. Mid-Continent Earthquakes as a Complex System. *Seismological Research Letters*, 80(4): 551—553. doi:10.1785/gssrl.80.4.551
- Song, T.R.A., Simons M., 2003. Large Trench-Parallel Gravity Variations Predict Seismogenic Behavior in Subduction Zones. *Science*, 301(5633): 630—633. doi: 10.1126/science.1085557
- Wan, Y.G., Shen, Z.K., Shen, S.Z., et al., 2010. The Mechanical Effects of the 2008  $M_s$ 7.3 Yutian, Xinjiang Earthquake on the Neighboring Faults and Its Tectonic Origin of Normal Faulting Mechanism. *Chinese J. Geophys*, 53(2): 280—289 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q.S., 2003. *Gravitology*. Seismological Press, Beijing, 128—147 (in Chinese).
- Wang, W.Y., 2010. Spatial Variation Law of the Extreme Value Positions of Total Horizontal Derivative for Potential Field Data. *Chinese J. Geophys*, 53(9): 2257—2270 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X.W., Tan, X.B., Wu, G.D., et al., 2011. Surface Rupture Features of the Yutian  $M_s$ 7.3 Earthquake and Its Tectonic Nature. *Seismology and Geology*, 33(2): 462—471 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Yang, J.S., Zhang, J.X., et al., 1999. A Comparison between the Tectonic Units on the Two Sides of the Altyn Sinistral Strike-Slip Fault and the Mechanism of Lithospheric Shearing. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 193—205 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X.Y., Chen, L.W., Yang, L.M., et al., 2013. Numerical Simulation on Strong Earthquake Dynamic Process of Bayan Har Block. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3): 304—314 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.M., Zhang, P.Z., 1999. Recent Research Progress on the Mechanism and Forecast for Continental Strong Earthquakes. *China Basic Science*, (Z1): 47—58 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P.Z., Deng, Q.D., Zhang, G.M., et al., 2003. Strong Earthquake Activities and Continental Block of Mainland China. *Science in China (Series D)*, 33(S1): 12—20 (in Chinese).
- Zhang, Y., Xu, L.S., Chen, Y.T., et al., 2014. Fast Inversion for the Rupture Process of the 12 February 2014 Yutian  $M_w$ 6.9 Earthquake: Discussion on the Impacts of Focal Mechanisms on Rupture Process Inversions. *Acta Seismologica Sinica* 36(2): 159—164 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈长云, 任金卫, 孟国杰, 等, 2013. 巴颜喀拉块体东部活动块体的划分、形变特征及构造意义. *地球物理学报*, 56(12): 4125—4141.
- 崔军文, 张晓卫, 李朋武, 2002. 阿尔金断裂: 几何学、性质和生长方式. *地球学报*, 23(6): 509—516.
- 高翔, 邓起东, 2013. 巴颜喀喇断块边界断裂强震活动分析. *地质学报*, 87(1): 9—19.
- 耿涛, 田黔宁, 杨汇群, 等, 2008. 阿尔金断裂西南端走向及延伸的区域重力场制约. *中国地质*, 35(5): 841—848.
- 李秋生, 彭苏萍, 高锐, 等, 2003. 青藏高原北部巴颜喀拉构造带基底隆起的地震学证据. *地质通报*, 22(10): 782—788.
- 李志海, 马宏生, 曲延军, 2009. 2008年3月21日新疆于田7.3级地震发震构造与震前地震活动特征研究. *中国地震*, 25(2): 199—205.
- 任收麦, 葛肖虹, 刘永江, 2003. 阿尔金断裂带研究进展. *地球科学进展*, 6(3): 386—391.
- 沈军, 宋和平, 陈建波, 等, 2013. 2008年3月21日新疆于田7.1级地震近断层破坏作用. *地学前缘*, 20(6): 89—97.
- 万永革, 沈正康, 盛书中, 等, 2010. 2008年新疆于田7.3级地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释.

地球物理学报, 53(2):280—289.  
 王谦身, 2003. 重力学. 北京: 地震出版社, 128—147.  
 王万银, 2010. 位场总水平导数极值位置空间变化规律研究. 地球物理学报, 53(9):2257—2270.  
 徐锡伟, 谭锡斌, 吴国栋, 等, 2011. 2008 年于田  $M_s 7.3$  地震地表破裂带特征及其构造属性讨论. 地震地质, 33(2):462—471.  
 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等, 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. 地质学报, 73(3):193—205.

杨兴悦, 陈连旺, 杨立明, 等, 2013. 巴颜喀拉块体强震动力学过程数值模拟. 地震学报, 35(3):304—314.  
 张国民, 张培震, 1999. 近年来大陆强震机理与预测研究的主要进展. 中国基础科学, (Z1):47—58.  
 张培震, 邓起东, 张国民, 等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学(D辑), 33(S1):12—20.  
 张勇, 许力生, 陈运泰, 等, 2014. 2014 年 2 月 12 日于田  $M_w 6.9$  地震破裂过程初步反演: 兼论震源机制对地震破裂过程反演的影响. 地震学报, 36(2):159—164.

\* \* \* \* \*

## 《地球科学学刊》(英文版)2015 年 2 月第 26 卷第 1 期要目预告

SEPRAN: A Versatile Finite-Element Package for a Wide Variety of Problems in Geosciences  
 ..... *Arie van den Berg, Guus Segal and David A. Yuen*

Evaluation of the Heat, Entropy, and Rotational Changes Produced by Gravitational Segregation during Core Formation  
 ..... *Anne M. Hofmeister and Robert E. Criss*

Use of Geochemical and Geophysical Techniques to Characterize and Prospect for Geothermal Resources and Hydrothermal Ore Deposits ..... *Robert E. Criss*

The Physics Underlying Gutenberg-Richter in the Earth and in the Moon ..... *Stuart Crampton and Yuan Gao*

Submicron Volume Roughness & Asperity Contact Friction Model for Principle Slip Surface in Flash Heating Process  
 ..... *Bojing Zhu, David A. Yuen, Yaolin Shi and Huihong Cheng*

Deep Geothermal: The ‘Moon Landing’ Mission in the Unconventional Energy and Minerals Space  
 ..... *Klaus Regenauer Lieb, Andrew Bungler, Hui Tong Chua, Arcady Dyskin, Florian Fusseis, Oliver Gaede, Rob Jeffrey, Ali Karrech, Thomas Kohl, Jie Liu, Vladimir Lyakhovskiy, Elena Pasternak, Robert Podgorney, Thomas Poulet, Sheik Rahman, Christoph Schrank, Mike Trefry, Manolis Veveakis, Bisheng Wu, David A. Yuen, Florian Wellmann and Xi Zhang*

The Lattice Solid/Boltzmann Microscopic Model to Simulate Solid/Fluid Systems—A Tool to Study Creation of Fluid Flow Networks for Viable Deep Geothermal Energy  
 ..... *Peter Mora, Yucang Wang and Fernando Alonso-Marroquin*

Underworld-GT Applied to Guangdong, a Tool to Explore the Geothermal Potential of the Crust  
 ..... *Steve Quenette, Yufei Xi, John Mansour, Louis Moresi and David Abramson*

Coupling of Thermal-Hydraulic-Mechanical Processes for Geothermal Reservoir Modelling  
 ..... *A. Karrech, O. Beltaief, R. Vincec, T. Poulet and K. Regenauer-Lieb*

Electro-Pulse-Boring (EPB): Novel Super-Deep Drilling Technology for Low Cost Electricity  
 ..... *Hans O. Schiegg, Arild Rødland, Guizhi Zhu and David A. Yuen*

Rock Plasticity from Microtomography and Upscaling ..... *Jie Liu, Reem Freij-Ayoub and Klaus Regenauer-Lieb*

Representation and Organization for Spatial Data in LBS ..... *Yanhui Wang and Yue Li*

Development and Application of a Regional Land Subsidence Model for the Plain of Tianjin  
 ..... *Yali Cui, Chen Su, Jingli Shao, Yabin Wang and Xiaoyuan Cao*

Evolution of Groundwater Major Components in the Hebei Plain: Evidences from 30-year Monitoring Data  
 ..... *Yanhong Zhan, Huaming Guo, Yu Wang, Ruimin Li, Chuntang Hou, Jingli Shao and Yali Cui*

Applicability of Artificial Recharge of Groundwater in the Yongding River Alluvial Fan in Beijing through Numerical Simulation ..... *Qichen Hao, Jingli Shao, Yali Cui and Zhenhua Xie*

Combined Use of Multivariate Statistical Analysis and Hydrochemical Analysis for Groundwater Quality Evolution: A Case Study in North Chain Plain ..... *Rong Ma, Jiansheng Shi, Jichao Liu and Chunlei Gui*