

新疆及周缘构造破裂特征及地震序列类型^①

李莹甄^{1,2}, 张博¹, 殷娜¹, 沈军¹, 邵博¹

(1.防灾科技学院, 河北燕郊 065201; 2.新疆维吾尔自治区地震局, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要:横亘新疆境内的天山及其周边的西昆仑、阿尔金和阿尔泰是中国大陆著名的强构造运动区和地震活动带。在对新疆构造区应力环境、动力过程、断层运动变形特征和地震序列分析讨论的基础上,对新疆及其周缘主要构造区地震破裂方式和序列类型进行研究,得出如下结论:(1)西昆仑构造区受来自青藏块体和塔里木块体NS和NW向水平压应力和垂向力的作用,构造运动呈现出走滑与逆冲特征,震源破裂以走滑型为主,数量较少的逆断型地震主要分布在西昆仑帕米尔一侧的深震挤压区,正断型地震主要出现在西昆仑与阿尔金交汇的拉张盆地及附近。该区主余型地震占63%,6级以上地震序列也存在多震类型。(2)阿尔金断裂带位于西昆仑北缘断裂和北祁连断裂过渡带,受青藏块体向北和向西的推挤,断裂本身的左旋位移量通过两端逆冲挤压而转化,使得青藏高原北边界不断向外扩展。在此力源下,阿尔金断裂带震源破裂以走滑为主,也有少量的逆冲型地震。地震序列中主余型和孤立型地震占比相同(占44%)。(3)在印度板块和亚欧大陆碰撞效应影响下,天山地区产生近NNE向水平压应力,构造运动显现出带旋性特征的逆冲和走滑,震源破裂方式与之相吻合。而天山构造大跨度的空间展布、扩展形式的多样性和地震破裂的两重性,又影响到地震序列类型的多样性,使得主余型、孤立型和多震型地震在不同构造部位呈现优势分布。(4)阿尔泰的构造运动可能受到了来自印度板块与亚欧板块碰撞的远程效应和西伯利亚块体南向运动的双向影响,形成NNE和SW向水平挤压力,主要大型发震断裂做右旋剪扭错动,而一些深断裂则以逆冲运动为主。震源破裂呈现出走滑(占64%)和部分的逆冲(占27%),6级以上地震序列主要为主余型,5级左右地震则多为孤立型。

关键词:震源机制;地震序列;新疆周边;地震活动性

中图分类号: P315.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)01-0036-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.01.0036

Tectonic Rupture Characteristics and Earthquake Sequence Types in Xinjiang and Its Adjacent Areas

LI Ying-zhen^{1,2}, ZHANG Bo¹, YIN Na¹, SHEN Jun¹, SHAO Bo¹

(1. Institute of Disaster Prevention, Yanjiao 065201, Hebei, China;

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

Abstract: In this study, we analyzed the characteristics of different types of earthquakes occurring in the north rim of the Tibetan Plateau, Tianshan, and Altai in view of regional geodynamic background, focal mechanisms, and research results of seismic sequences of the Xinjiang area considering the effect of earthquake rupture and sequences.

West Kunlun is located in the eastern wing of Pamir arc, with a tectonic style of extrusion

① 收稿日期: 2015-03-04

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金课题(2011211A105); 科技部国际合作专项(2012DFR20440K02); 中央高校基本科研业务费专项基金(ZY20140201)

作者简介: 李莹甄(1968—)女, 副研究员, 主要从事自然灾害学、地震预测研究与教学。E-mail: 15097624665@163.com。

conversion system consisting of both strike-slip and thrust structures, thus indicating upliftment of West Kunlun in the Cenozoic. In the area, earthquakes have a combination of characteristics of strike-slip and major-after earthquakes, with the dominant strike-slip characteristics accounting for 60% of the sequences, and major-after characteristics accounting for 63% of sequences. Earthquakes with magnitudes greater than 6 are primarily major-after and individual multiple-shock type earthquakes. Seismic activity characteristics of major-after earthquakes indicate that the stress state of West Kunlun is strong and the rupture strength is medium.

The Arkin fault has been pushed to the north and west by the Qingzang Block. The escape wedge formed by the Arkin and Karakoram faults causes the thrust of northern West Kunlun and North Qilian faults to gradually transit through the Arkin fault zone. On the other hand, the sinistral displacement of the Arkin fault transforms through both-end thrust extrusion, resulting in an arc bending at the eastern and western end of the West Kunlun and North Qilian. Therefore, the northern border of the whole plateau extends outward. Similarly, earthquake sequence types in the Arkin fault are characterized by strike-slip, major-after, and isolated earthquakes. Strike-slip ruptures are dominant in the area, and major-after and isolated earthquakes each account for 44% of the seismic sequence. Isolated earthquakes typically have a magnitude below 6.5. The 7.3 magnitude Yutian earthquake that occurred in 2014 conformed to the characteristics of this type of earthquake.

Owing to the effect of India-Asia continental collision and its effect on the later continental convergence distance, Tianshan shows complete vertical crust shortening under the horizontal compressive, oblique shear transform deformation, and lateral deformation expanding on both sides of the basin. Active faults include reverse and strike-slip faults with rotating characteristics. Seismic rupture mode of Tianshan is complex, with strike-slip and thrust earthquakes being dominant (46% and 38%, respectively). Contact ways of tectonics in different directions and movement characteristics add to the complexity and diversity of seismic sequence types in the Tianshan region. Major-after earthquake sequences account for 50% of seismic sequences, whereas isolated earthquake sequences account for approximately 40% of sequences. In individual regions such as the western part of south Tianshan, tectonics crisscross with strong movement, and the earthquake sequence shows multiple aftershocks.

The Altai fault exhibits dextral shear dislocation under NNE and SW horizontal extrusion, and some of the deep fractures experienced significant thrust movement with obvious fracture topography. Strike-slip, thrust and major-after, and isolated combined earthquake seismic types are formed under different conditions such as regional tectonic stress and fault movement. Isolated earthquakes are primarily medium earthquakes with a magnitude of approximately 5.

Key words: focal mechanism; earthquake sequence; adjacent areas of Xinjiang; seismic activity

0 引言

新疆地震构造区位于欧亚大陆的中部,南与世界屋脊青藏高原毗邻,区内发育着挤压特征显著的大陆内部新生代再生造山带和压陷盆地,组成挤压型盆岭构造。西昆仑与阿尔金-塔里木盆地-天山-准噶尔盆地-阿尔泰山是新疆最典型地貌与构造区域。在这些再生造山带内发育具有调节纵向不均匀缩短并传递变形的 NW 向和 NE 向大型剪切断

裂,分属右旋和左旋走滑断裂,在其边缘的山前坳陷内发育了近 EW 向的逆断裂及其控制的活动褶皱带。此外,受近 EW 向活动逆断裂控制,在再生造山带内发育了许多山间压陷盆地^[1-2]。

西昆仑、阿尔金、天山和阿尔泰是中国大陆著名的强震活动带。据不完全统计,1800 年以来西昆仑地震带发生 7 级地震 4 次,6 级地震 15 次,最大地震为 1895 年 7 月 5 日塔什库尔干 7.5 级地震;阿尔

金地震带 1900 年以来发生 8 级地震 1 次, 7 级地震 4 次, 6 级地震 8 次, 最大地震为 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震; 天山地震带 1700 年以来发生 7 级地震 25 次, 8 级地震 3 次, 最大地震为 1889 年 7 月 11 日阿拉木图 8.3 级地震; 阿尔泰地震带发生 8 级地震 1 次, 7 级地震 3 次, 6 级地震 5 次, 最大地震为 1931 年 8 月 11 日发生在我国富蕴的 8.0 级地震。

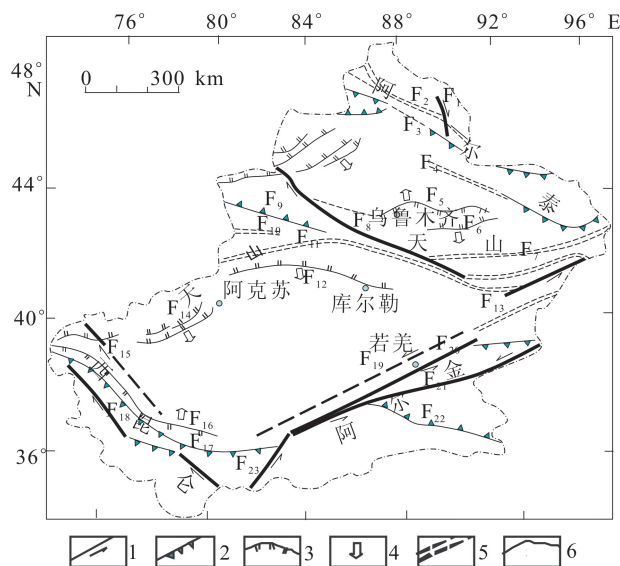
新疆强烈地震活动与其特殊的构造区位密切相关。西昆仑、阿尔金、天山和阿尔泰活动构造主要继承了该区的新构造运动, 是自晚始新世至渐新世印度次大陆与欧亚大陆碰撞以来, 印度板块继续向北推挤的远程效应及其在兴都库什强烈挤压的结果。在塔里木地块、哈萨克地台、准噶尔地块和西伯利亚—蒙古地块的阻挡下, 西昆仑、阿尔金、天山、阿尔泰岩石圈变形强烈, 断层滑动速率增大, 导致地震活动强烈、频繁^[3]。

震源破裂方式和地震序列类型是研究地震活动性的重要参数, 两者不仅是震区介质及应力状态、动力过程和发震断层几何性状的具体体现, 而且受区域构造格局的制约, 也反映了区域构造运动的过程和结果^[4]。本文从分析新疆及其周缘应力场及构造运动特征入手, 对上述区域强震发震构造力学性质和地震学参数等方面进行对比分析, 以期新疆地震活动研究与预测提供帮助。

1 新疆及其周缘主要构造区及破裂格局

图 1 简要绘出新疆构造区和主要的活动断裂。在区域构造应力场的作用下, 这些活动断裂的分布、运动方式和破裂格局决定了新疆地区的地震活动。

天山构造带由南天山、北天山和二者夹持的山间盆地组成。构造运动表现为水平挤压下的地壳垂向缩短、斜向剪切转换变形和向两侧盆地的横向扩展变形, 形成主脉根部的高角度逆断层控制的厚皮推覆构造和前陆盆地内低角度逆掩断裂控制的薄皮推覆构造, 以及调节纵向不均匀缩短并传递变形的大型剪切断裂^[1]。现代破裂体系主要由以 NE 向柯坪推覆体和 EW 向库车推覆体为代表的逆冲断裂发生的旋扭性破裂和以近 NW 向博—阿断裂、费尔干纳断裂为代表的右旋走滑断裂发生的剪切破裂组成^[5-7]。另外, 受印度板块向北推挤的西动力源(帕米尔)的影响, 在西昆仑与天山交汇部位形成复杂的构造运动和特殊的受力环境, 以及多样的破裂格局^[5]。



1: 走滑断裂; 2: 逆冲断裂; 3: 推覆断裂; 4: 推覆方向;
5: 韧性剪切带; 6: 断裂编号;

断层编号: F₁: 可可托海—二台断裂; F₂: 库尔特断裂; F₃: 额尔齐斯断裂; F₄: 克拉麦里断裂; F₅: 东天山北缘(二道沟)断裂; F₆: 博格达南缘断裂; F₇: 吐鲁番盆地中央断裂; F₈: 博罗科努—阿其克库都克断裂; F₉: 伊犁盆地北缘—喀什河断裂; F₁₀: 恰克博河断裂; F₁₁: 那拉提—包尔图—黑尖山断裂; F₁₂: 却勒塔格—拜城盆地—北轮台断裂; F₁₃: 塞里克萨依断裂; F₁₄: 柯坪断裂; F₁₅: 塔纳斯—费尔干纳断裂; F₁₆: 柯岗断裂; F₁₇: 康西瓦断裂; F₁₈: 喀喇昆仑断裂; F₁₉: 车尔臣断裂; F₂₀: 阿尔金北缘断裂; F₂₁: 阿尔金南缘断裂; F₂₂: 吐拉—昆仑山中部断裂

图 1 新疆断裂系统略图

Fig.1 The fault system in Xinjiang

西昆仑造山带位于青藏高原的西部, 喜马拉雅帕米尔西构造结的东北部, 印度板块和欧亚板块的结合部。新生代以来西昆仑受到 SW 方向青藏高原和塔里木地块的双向对冲作用(图 2), 在西昆仑山前形成与山体走向一致的纵向活动断裂, 使得 NW 向高角度的喀喇昆仑断裂发生右旋走滑运动, 形成剪切破裂; NWW 向高角度的康西瓦断裂发生显著的逆冲运动, 形成大量冲断破裂。在 60~40 Ma 之后, 康西瓦和阿尔金左行走滑断裂连接起来, 形成中亚最大的走滑断裂; NW-EW 低角度的西昆仑北缘断裂(铁克里克断裂)则发生了逆冲和左旋走滑运动, 形成剪扭性破裂^[9]。这三组断裂共同构成了西昆仑现代破裂格局。

阿尔金和西昆仑及北祁连构造带共同构成青藏高原的北部边界。在 NS 向水平压应力的作用下, 青藏块体北向运动受到塔里木块体阻挡后, 开始沿阿尔金断裂和高原中北部大型走滑断裂做侧向挤出

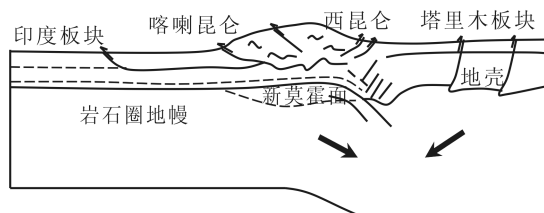


图 2 青藏块体与塔里木块体在西昆仑的相向俯冲碰撞(据高锐^[10])

Fig.2 Subduction and collision of Qinghai-Tibet Block and Tarim Block at West Kunlun (After GAO Rui^[10])

运动,阿尔金构造带起到连接和转换作用^[9-10]。阿尔金断裂带在大陆碰撞以后的前期属于挤压-走滑运动,而现今则以左旋走滑运动为主,在阿尔金与西昆仑的交接转换部位则还存在张剪性作用^[11]。

阿尔泰位于哈萨克斯坦板块和西伯利亚板块的缝合线附近,喜马拉雅运动使山体沿北西向断裂发生断块抬升,形成现今阿尔泰山地貌。在西伯利亚块体南向运动的影响下,阿尔泰受到 NE 方向水平挤压力的作用,形成以富蕴地震断裂带为代表的一组 NNW 向右旋走滑运动,产生扭动剪切破裂,组成其现代破裂格局^[12-14]。

2 新疆及其周缘地震破裂特征

现代构造应力场是驱动地壳断裂构造活动并孕育发生地震的基本成因,震源机制解是研究区域构造应力场的基础资料和常用方法。对震源机制解的统计分析,可以再现区域应力场基本特征及其震源破裂特征,有助于对发震断层及区域活动构造与应力场之间的关系进行研究。

2.1 资料与方法

依照第 1 节构造区的范围与命名,划分出天山、西昆仑、阿尔金和阿尔泰 4 个研究区。

本文震源机制解资料主要来源于:(1)新疆地区历史中强地震的震源机制解^[15];(2)2000 年以后部分 5 级左右地震采用 P 波初动符号和振幅比法求得震源机制;(3)哈佛大学 CMT 目录。本文共收集到震源机制解 288 个。图 3 显示了这些震源机制解的分布,其中阿尔泰 12 个,天山 127 个,新疆其他地区 89 个,西昆仑 45 个,阿尔金 12 个。图 4 显示了新疆地区主压应力 P 轴方位分布。

在一个具有均匀应力场的区域,每一次地震都将会沿断层面的剪切应力的方向产生滑动,采用多次地震的震源机制解就能反演出区域构造应力场^[16-18],地震的破裂方式则可以通过应力轴倾角的

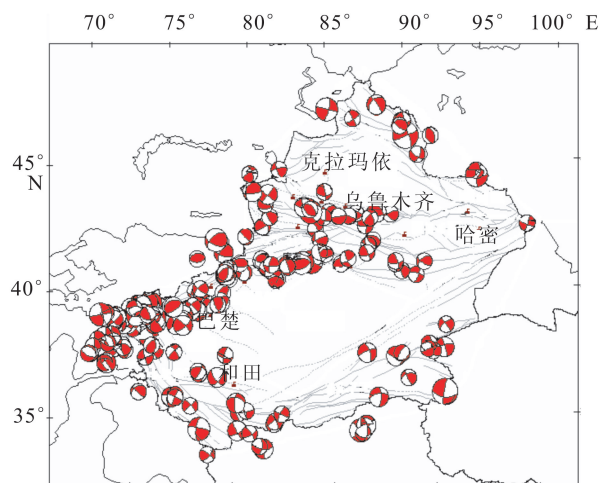


图 3 1931—2005 年新疆 5 级以上地震震源机制解

Fig.3 Distribution of focal mechanisms of $M \geq 5.0$ earthquakes in Xinjiang from 1931 to 2005

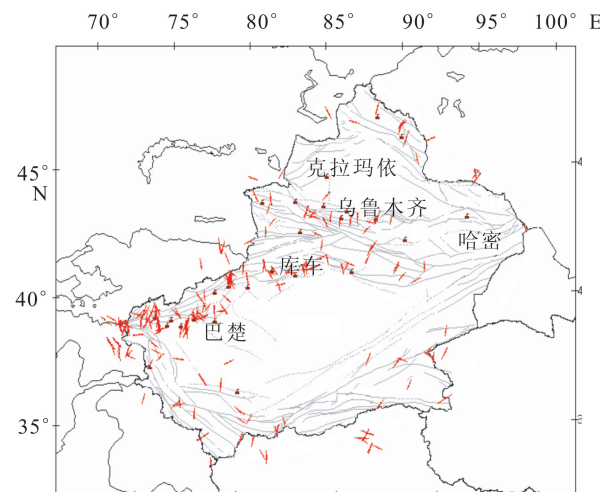


图 4 新疆地区主压应力 P 轴方位图

Fig.4 Azimuth of principal compressive stress P-axis in Xinjiang area

变化加以界定。根据马文涛等^[19]提出的三角形图解法,将地震破裂类型分为 4 类:正断型, P 轴倾角 $\geq 45^\circ$;逆断型, T 轴倾角 $\geq 45^\circ$;走滑型, N 轴倾角 $\geq 45^\circ$;过渡型,三个应力轴倾角 $< 45^\circ$ 。

由图 4 可见,新疆地区 P 轴方向基本上与该区主要的构造走向垂直,大多数 P 轴方位为 NNW、NS 方向, P 轴、 T 轴优势倾角均小于 30° , N 轴优势倾角则在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 。可见新疆地区主要受 NNE 向水平压应力的作用。王盛泽等^[20]认为新疆地区仍以 NS 方向为主,辅以 NNE、NW 方向,呈大扇形分布;近些年高国英等^[21-22]也提出新疆近期构造应力场方向为 NNE 与 NW 方向。本文与前人所得结论较

为一致。

表 1 对新疆 228 个震源机制解统计显示,走滑型地震约占 47.37%,占绝大多数,其次是逆断型地震,占 35%,正断型和过渡型地震比例较低。这与水平压应力环境下断层较多地表现出走滑与逆冲的运动特性相一致。可以认为,新疆应力区力源主要来自青藏块体向北的推挤,区内最大主压应力方向

表 1 新疆地震破裂类型统计

Table 1 Statistics of earthquake rupture types in Xinjiang

地震破裂类型	逆断型	走滑型	正断型	过渡型	总计
统计个数	80	108	23	17	228
所占比例/%	35.09	47.37	10.09	7.46	

以近 NS 向为主,震源破裂方式以逆断型和走滑型为主。

2.2 构造分区应力场特征和震源破裂类型

相较于中小地震震源破裂方式的随机性,较大地震的震源机制解更能近似反映区域构造应力场的特征,其地震破裂方式也较能反映区域构造的运动特征。本文从上述资料中选取 195 个 5 级以上地震的震源机制解,采用统计学方法,对震源机制参数(P,T 和 N 轴方位、P,T 和 N 轴倾角)进行计算,绘制震源机制解参数归一化玫瑰图(图 5),讨论西昆仑、阿尔金、天山和阿尔泰地区构造应力场特征、地震破裂特性及动力学依据。

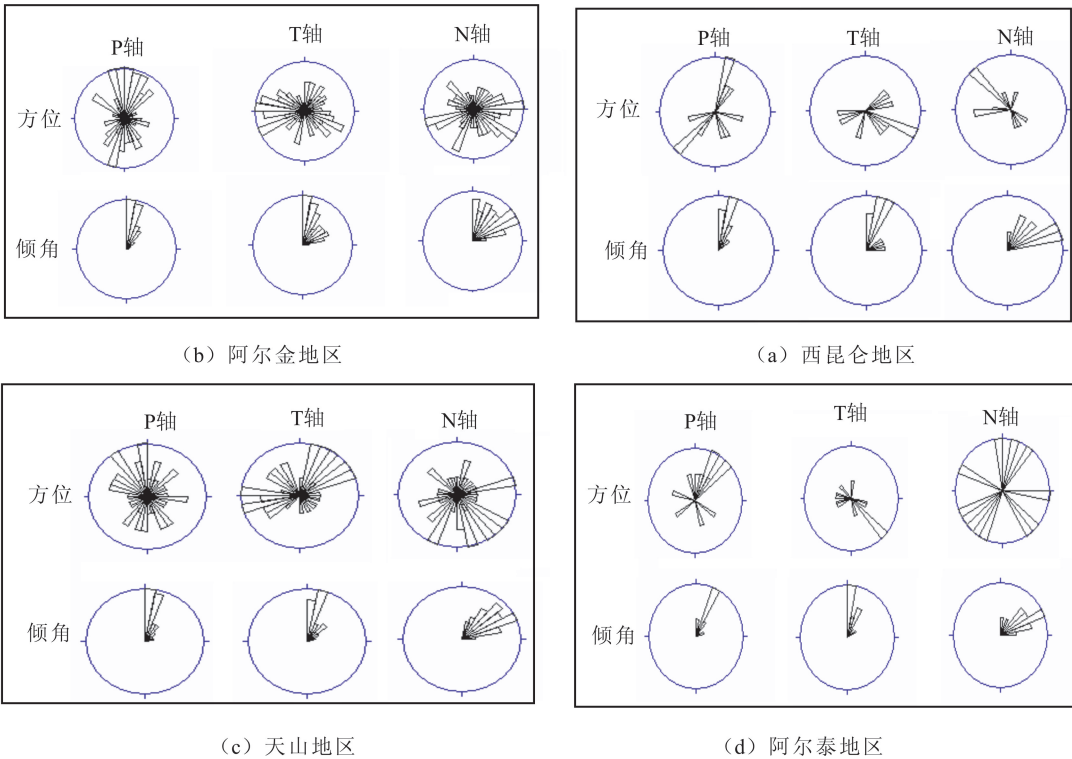


图 5 西昆仑、阿尔金、天山和阿尔泰地区震源机制参数归一化玫瑰图

Fig.5 Normalized rose map showing parameters of focal mechanism in West Kunlun, Altun, Tianshan, and Altai

各区平均应力场如图 5 所示,印度板块向北碰撞挤压欧亚板块,导致青藏高原抬升,使其西北缘的西昆仑受到 NW 向,阿尔金受到 NE 向力的作用,形成大量左旋走滑断层;位于印度板块西动力源前方的天山在 NNW 和 NS 向水平力的作用下,右旋走滑和带有旋性特征的逆冲断裂发育;而阿尔泰受准噶尔地块和蒙古高原—阿拉善地块的阻拦,在南下西伯利亚板块的影响下,形成 NE—SW 向的构造应力场。

由表 2 对比西昆仑、阿尔金、天山和阿尔泰地震破裂,发现以走滑型破裂为主,约占 50%以上,其次

是逆断型破裂,约占 30%左右。以阿尔金走滑型地震比例最高,几乎达到 70%;阿尔泰和西昆仑次之,走滑型破裂分别占 63%和 60%,天山地区最少,仅占 45%。

天山地区逆冲型地震比例显著上升,达到 38%,阿尔金显著下降,仅占 8%,阿尔泰和西昆仑分居三、四。对比还发现,青藏高原北缘、天山和阿尔泰正断型地震较少,仅占 7.7%,主要分布在南天山西段和西昆仑弧形构造顶端或两组构造转换的拉张部位。以走滑和逆断型为主要组合特征的过渡型

表 2 西昆仑、阿尔金、天山、阿尔泰地区地震类型统计

Table 2 Statistics of earthquake types in West Kunlun, Altun, Tianshan, and Altai

构造区	地震样本数	地震破裂类型			
		逆断型地震数 /所占比例%	走滑型地震数 /所占比例%	正断型地震数 /所占比例%	过渡型地震数 /所占比例%
西昆仑	45	8/17.78	27/60	6/13.33	4/8.89
阿尔金	12	1/8.33	9/75	1/8.33	1/8.33
天山	127	49/38.58	58/45.67	9/7.09	11/8.67
阿尔泰	11	3/27.27	7/63.63	0	1/9.09
合计	195	61/31.28	101/51.79	16/7.69	17/8.71

地震在各区的比例约占 8.7%。

可以看出,在近南北向构造应力的作用下,西昆仑、阿尔金、天山和阿尔泰及其交汇部位具有构造运动复杂、强震频发、地震破裂方式多样的特点。

3 新疆及其周缘地震序列类型

3.1 地震序列资料与判定方法

本文用于地震序列类型研究的地震序列目录,来自于收集整理的 1970—2010 年新疆 $M_s \geq 5.0$ 地震序列,共 130 个^[23]。序列类型的判定采用了蒋海昆^[24]序列判定准则,即统一以序列主震 M_0 与 3 个月内最大余震 M_1 之间的震级差 $\Delta M = M_0 - M_1$ 进行序列类型划分,分出孤立型、主余型及多震型(双震型归并到多震型)三类。具体划分标准为:孤立型, $\Delta M > 2.4$,对于没有余震的单发式中等地震,也命名为孤立型地震;主余型, $0.6 < \Delta M \leq 2.4$;多震型, $\Delta M \leq 0.6$ 。1970 年以来新疆 5 级以上地震序列类型分布见图 6。

涵盖了主余型、孤立型和多震型等不同类型的地震。由表 3 统计显示,5 级以上中强地震以主余型为主,占据全部序列类型的一半以上,其次是孤立型地震,占 39%,多震型地震较少,约占 9%。从震级分布看,5.0~5.9 级地震中孤立型地震较多,超过主余型,占到 48%;6.0~6.9 级地震以主余型居多,占到 71%,震群型地震也较为突出,占到 19%;7 级以上地震几乎全部为主余型。同样按照第 1 节构造区范围与命名,划分出天山、西昆仑、阿尔金和阿尔泰 4 个区进行地震序列类型的对比分析。

表 3 新疆地区地震序列类型统计

Table 3 Statistics of types of earthquake sequences in Xinjiang

序列类型	震级分档统计(地震数/比例)			总计
	5.0~5.9	6.0~6.9	≥ 7.0	
主余型	46/0.45	15/0.71	7/1.00	68/0.52
孤立型	48/0.48	2/0.10	0	50/0.39
多震型	8/0.078	4/0.19	0	12/0.09
总计	102	21	7	130

3.2 构造分区地震序列类型对比

由表 4 可知,5 级以上地震序列西昆仑区有 24 个,阿尔金区 9 个,天山区 91 个,阿尔泰区 6 个。对比地震序列类型可以看出,四个构造区主余型地震所占的比例一般在 50% 以上,孤立型地震排行第二,约占 38%。主余型地震以西昆仑区最高,可达到 63%;阿尔金区最低,只占 44%。孤立型地震以

表 4 西昆仑、阿尔金、天山和阿尔泰地震序列类型统计

Table 4 Statistics of types of earthquake sequences in West Kunlun, Altun, Tianshan, and Altai

分区	各类型地震序列数/所占比例			地震序列数
	主余型	孤立型	多震型	
西昆仑	15/0.63	7/0.29	2/0.08	24
阿尔金	4/0.44	4/0.44	1/0.11	9
天山	46/0.51	37/0.40	8/0.09	91
阿尔泰	3/0.50	2/0.33	1/0.16	6
各类型地震序列数/所占比例	68/0.52	50/0.38	12/0.09	130

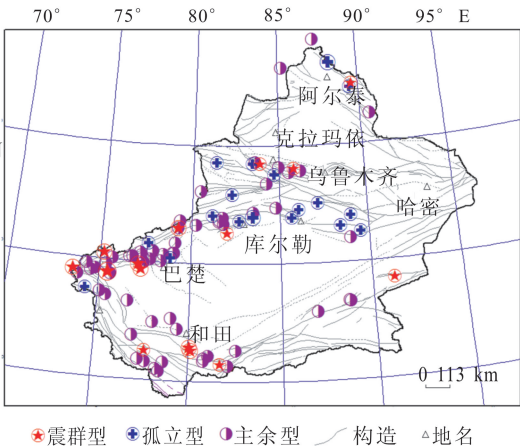


图 6 1970 年以来新疆 5 级以上地震序列类型分布
Fig.6 Distribution of types of $M_s \geq 5.0$ earthquake sequences in Xinjiang since 1970

从图 6 可以看出,新疆地区地震序列类型多样,

阿尔金区最高,可以达到 44%;西昆仑区最低,仅为 29%。四个构造区多震型地震所占比例较低,约为 9%,且较为集中分布在南天山西段。

一些研究认为,地震序列类型空间分布特征主要与构造的应力水平和介质的不均匀性、区域构造运动方式、深部介质环境、震级及历史地震活动等有关^[25-28],如震群型往往与共轭构造或多组构造交汇相联系,而简单断层端部的进一步扩展大多产生孤立型。新疆地区孤立型及多震型主震震级均小于 6.5 级,绝大多数 6.5 级以上地震的序列为主余型;多震型大多分布在历史大震震中区附近(现代构造运动强烈地区),这种地震序列特征可能与上述因素有关。由于新疆地区深浅部介质特性、区域构造运动细节研究并不全面深入,因而还无法就地震序列的类型成因做一一对应解释,本文仅在结论部分对南天山西段震群型地震的成因做了个别讨论。

4 结论与讨论

区域构造运动特征和地震序列类型是判定区域地震活动性和地震趋势发展的一项重要基础工作。结合新疆地区地球动力背景、震源机制和地震序列的研究结果,并考虑地震破裂方式和序列类型的影响因素,对新疆及其周缘构造破裂特征及地震序列类型进行对比,综合分析认为:

4.1 西昆仑区地区

西昆仑为帕米尔弧之东翼,主压应力 P 轴优势方位为 NS 和 NW 向,主张应力 T 轴优势方位为 NE 及 EW 向,中等应力轴 N 优势方位为 SE 向;P 轴和 T 轴倾角在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 最为集中,N 轴倾角主要集中在 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,显示该区活动断裂受到来自青藏块体和塔里木块体 NS 和 NW 向水平挤压应力的作用,且受到较强的垂向力的影响。西昆仑北缘的构造样式以走滑与逆冲共同组成的挤压转换为特征,构成西昆仑在新生代剧烈隆升的主要机制^[10],导致近现代一系列强震发生。

该区走滑型地震占据优势,约占 60%,其次是逆断型和正断型,分别占 18%和 13%。逆断型地震主要分布在西昆仑帕米尔一侧的深震区;正断型地震主要发生在西昆仑与阿尔金交汇的阿什库勒盆地及附近。该区主余型地震占 63%;孤立型地震次之,占 29%;多震型占 8%。6 级以上地震主要为主余型和个别的多震型。由主余型为主的地震活动特征推断,西昆仑目前仍处于较强应力状态,介质破裂强度属中等。在断裂的某些段落现今中小地震活动

微弱,可能存在闭锁单元或障碍体。

4.2 阿尔金地区

受青藏块体向北和向西的推挤,阿尔金现今主压应力 P 轴优势方位为 NE,T 轴优势方位为 SE 方向;P 轴倾角约 30° ,T 轴倾角约 10° ,N 轴倾角约 70° 。由阿尔金断裂带和喀喇昆仑断裂带形成的逃逸楔,一方面使西昆仑北缘断裂和北祁连断裂逆冲作用通过阿尔金断裂带逐渐过渡,另一方面阿尔金断裂带的左旋位移量,通过两端逆冲挤压而转化,在东西端部造成北祁连和西昆仑的弧形弯曲,从而实现整个高原的北部边界向外扩展过程^[29]。在深部构造上,阿尔金构造带存在 1.2 s 左右的各向异性,可能源于上地幔物质在垂直面内发生的水平剪切流动^[11]。

在上述构造应力、地震断层扩展及深部构造运动方式等作用背景下,阿尔金断裂带地震破裂以走滑为主,也有少量的逆冲型地震。地震序列中主余型和孤立型地震占比相同(占 44%)。孤立型地震多为 6.5 级以下,主要发生在低破裂强度的区域。2014 年于田 7.3 级地震属于走滑破裂,地震序列类型为主余型,较好地符合了这一地区的构造特征和序列类型。但 2008 年于田 7.3 级地震属于正断破裂,这次地震发生在阿尔金断裂西南端 NE 向张剪切段邻近区域,发震断层归属于阿尔金断裂西南尾端的张性区构造,反映出昆仑—柴达木—祁连块体存在向东滑移的现象^[30]。

4.3 天山地区

天山主压应力 P 轴方位基本与构造走向垂直,优势方位 NNW 和 NS 向,P 轴、T 轴优势倾角均小于 30° ,N 轴则在 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$,显见天山地区主要受 NNE 向水平压应力的作用。印度和亚洲大陆碰撞及随后陆陆汇聚产生的远程效应,是造成天山两侧山前新生代构造变形在南北方向上相似性和差异性的主要原因;而天山山体内部先存的相对刚性地块和大型断裂,则导致了新生代构造变形的东西向分段差异性特征^[31-32]。在上述动力环境下,天山总体表现为水平挤压下的地壳垂向缩短、斜向剪切转换变形和向两侧盆地的横向扩展变形,活动断层多为具有旋性特征的逆断层和走滑断层^[1],这也使得走滑型和逆断型地震占据相当的数量(分别占 46%和 38%)。

在强的挤压环境下,天山断层走向、扩展形式的多样性和地震破裂的两重性,又影响到地震序列类型的多样性。该区主余型地震占 50%,孤立型地震

约占 40%,多震型地震约占 9%。个别构造段地震序列类型差别较大,如天山东部(石河子—库车以东的地区)中下层地壳呈现低速块体被高速块体包裹低破裂强度区^[33],现代 5 级左右地震活跃,几乎都为孤立型,且多分布在扩展断裂的端部;而南天山西段构造交错,运动强烈,强震群活跃。

南天山西段断裂带地震活动频度高、强度大,尽管分布有许多主余型,但震群型地震活动在该区最为突出,如 1955 年 4 月 15 日乌恰西 7.0 级双震、1961 年巴楚西 6 级强震群、1997—1998 年伽师 6 级强震群和 2008 年 10 月乌恰 6 级强震群等。伽师强震群发生在塔里木盆地西北缘与天山接壤的边缘部位,该区地壳向西南急剧下倾插入西昆仑山下,伽师地区正处于地壳厚度急剧变化的地带,莫霍面在伽师下方一定的区域范围之内形成一个明显的、局部性的上地幔隆起,其壳内速度结构也存在强烈的非均匀性(图 7),致使在伽师及其邻区形成了复杂的构造运动和特殊的受力环境^[34],这些因素为该强震群的孕育发生提供了动力来源。由于伽师震区处在强烈的构造活动环境之中,其抗剪能力较弱的震源体介质不易积聚较强的应力而发生强度更大的地震^[35],从而决定了伽师地区独特的震群型发震特点。另外该构造带由多条次级新生断层组成,呈斜列或共轭展布,共轭构造活动可能是伽师强震群频繁发生的另一个重要因素。

蕴断裂和额尔齐斯断裂均做右旋剪扭错动,而一些深断裂如恰尔苏断裂、北塔山断裂则以逆冲运动为主^[13-14]。该区走滑型地震占 64%,逆冲型占 27%,1931 年富蕴 8 级大震就是在区内 NNE 向水平挤压力下发生剪扭性错动的典型震例。

该区 6 级以上地震序列主要为主余型。1990 年哈萨克斯坦斋桑 7.3 级和 2003 年中俄交界地震序列属于主余型;该区孤立型地震占 33%,主要为 5 级左右中等地震;多震型占 16%。

通过地震序列和强震震源机制研究表明,就新疆全区而言,地震断层基本为逆断和走滑型,地震破裂也以这两种类型为主,地震序列以主-余震型为主,这与新疆所处的大地构造区位、活动块体以及主要活动断裂的动力学、运动学以及几何学特征相一致,在这样的大背景下,新疆几大构造区又受各自构造运动、介质、深部环境及应力场的控制形成特殊的地震破裂方式和地震序列类型。

如果将天山、阿尔泰等视为一级地震构造分区的界限,那么对于监视地震孕育过程更为重要的是进一步的分区,如天山东、西两段地震断层性质不同,南天山西段基本为逆冲和走滑型,地震序列主要为主余型和多震型,而天山东段以逆冲型地震为主,地震序列为孤立型,因此有必要对天山构造区进一步细化,深入探讨不同构造段落不同力源作用下相对独立的孕震过程,此项研究将另文论述。

参考文献(References)

- [1] 邓起东,冯先岳,张培震,等.天山活动构造[M].北京:地震出版社,2000.
Deng Qi-dong, FENG Xian-yue, ZHANG Pei-zhen, et al. Active Tectonics of the Chinese Tianshan Mountains[M]. Beijing: Seismological Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 戈淑漠. 中亚地区大陆碰撞的影响与作用力[J]. 科学通报, 1983(7): 423-425.
GE Shu-mo. The Impact and Interaction of the Continental Collision in Central Asia[J]. Chinese Science Bulletin, 1983(7): 423-425. (in Chinese)
- [3] 戈淑漠. 亚洲大陆内大地震的构造特征[J]. 内陆地震, 1987, 1(1): 24-31.
GE Shu-mo. The Structural Characteristics of Great Earthquakes in Asia Inland[J]. Inland Earthquake, 1987, 1(1): 24-31. (in Chinese)
- [4] 皇甫岗,秦嘉政,李忠华,等. 云南地震类型分区特征研究[J]. 地震学报, 2007(2): 142-150.
HUANGPuGang, QIN Jia-zheng, LI Zhong-hua, et al. Subarea Characteristics of Earthquake Types in Yunnan[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007(2): 142-150. (in Chinese)

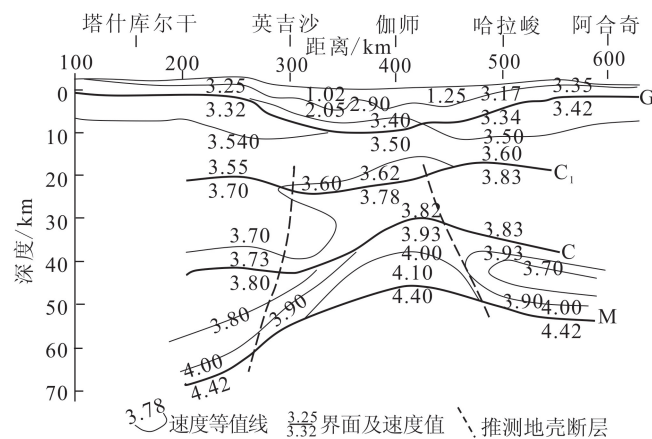


图 7 南天山西段 S 波二维速度结构图

(据赵金仁^[36])

Fig.7 The 2D S-wave velocity structure in the western segment of South Tianshan (After ZHAO Jin-ren)

4.4 阿尔泰地区

阿尔泰地区主压应力 P 轴主体方位 NNE。主压应力 P 轴仰角平缓,中等应力 N 轴较陡,在 NNE 和 SW 向水平挤压力下,该区主要的发震构造如富

- [5] 宋方敏, 闵伟, 韩竹军, 等. 柯坪塔格推覆体的新生代变形与扩展[J]. 地震地质, 2006, 28(2): 224-233.
SONG Fang-min, MIN Wei, HAN Zhu-jun et al. Cenozoic Deformation and Propagation of the Kalpintag Fold Nappe[J]. Seismology and Geology, 2006, 28(2): 224-233. (in Chinese)
- [6] 沈军, 吴传勇, 李军, 等. 库车坳陷活动构造基本特征[J]. 地震地质, 2006, 28(2): 269-278.
SHEN Jun, WU Chuan-yong, LI Jun, et al. The Basic Features of the Active Tectonics in the Kuqa Depression of the Southern Tianshan[J]. Seismology and Geology, 2006, 28(2): 269-278. (in Chinese)
- [7] 沈军, 汪一鹏, 李莹甄, 等. 中国新疆天山博阿断裂晚第四纪右旋走滑运动研究[J]. 地震地质, 2003, 25(2): 183-195.
SHEN Jun, WANG Yi-peng, LI Ying-zhen, et al. Late Quaternary Right-lateral Strike-slip Faulting along the Bolokenu-Aqikekuduke Fault in Chinese Tianshan[J]. Seismology and Geology, 2003, 25(2): 183-195. (in Chinese)
- [8] 田勤俭, 丁国瑜, 郝平. 南天山及塔里木盆地西北缘构造带西段地震构造研究[J]. 地震地质, 2006, 28(2): 213-223.
TIAN Qin-jian, DING Guo-yu, HAO Ping. Seismotectonic Study on West Part of the Interaction Zone Between Southern Tianshan and Northern Tarim[J]. Seismology and Geology, 2006, 28(2): 213-223. (in Chinese)
- [9] 高锐, 肖序常, 高弘, 等. 西昆仑—塔里木—天山岩石圈深地震探测综述[J]. 地质通报, 2002, 21(1): 11-20.
GAO Rui, XIAO Xu-chang, GAO Hong, et al. Summary of Deep Seismic Probing of the Lithospheric Structure across the West Kunlun — Tarim — Tianshan[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(1): 11-20. (in Chinese)
- [10] 高锐, 黄东定, 卢德源, 等. 横过西昆仑造山带与塔里木盆地结合带的深地震反射剖面[J]. 科学通报, 2000, 45(17): 1873-1879.
GAO Rui, HUANG Dong-ding, LU De-yuan, et al. A Deep Seismic Reflection Profile across the Western Kunlun Orogenic Belt and Belt of the Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(17): 1873-1879. (in Chinese)
- [11] 郑荣章, 徐锡伟, 王峰, 等. 阿尔金构造系晚更新世中晚期以来的逆冲活动[J]. 地震地质, 2005, 27(3): 361-373.
ZHENG Rong-zhang, XU Xi-wei, WANG Feng, et al. the Thrust Activity of the Altyn Fault Zone Since the Middle and Late Pleistocene[J]. Seismology and Geology, 2005, 27(3): 361-373. (in Chinese)
- [12] 新疆维吾尔自治区地震局. 富蕴地震断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1985: 163-187.
Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autnomous Region. The Fuyun Earthquake Fault Zone in Xingjiang, China[M]. Beijing: Seismological Press, 1985: 163-187. (in Chinese)
- [13] 田勤俭, 张军龙. 蒙古阿尔泰山东缘新发现的地震地表破裂带[J]. 地震地质, 2008, 30(1): 324-332.
TIAN Qin-jian, ZHANG Jun-long. New Finding of Earthquake Rupture in the Eastern Margin of Mongolian Altai[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(1): 324-332. (in Chinese)
- [14] 沈军, 李莹甄, 汪一鹏, 等. 阿尔泰山活动断裂[J]. 地学前缘, 2003, 10(增刊): 132-141.
SHEN Jun, LI Ying-zhen, WANG Yi-peng, et al. The Active Faults in Altai Mountains[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(Supp): 132-141. (in Chinese)
- [15] 新疆维吾尔自治区地震局. 天山地震目录及中强震震源机制解[J]. 内陆地震, 1997, 11(增刊): 142-160.
Seismological Bureau of Xingjiang Uygur Autonomous Region. Catalogue of Earthquakes and Source Mechanism Solution of Medium and Strong Earthquakes in Tianshan Area[J]. Inland Earhquake, 1997, 11(Supp): 142-160. (in Chinese)
- [16] Gephart J W, Forsyth D W. An Improved Method for Determining the Regional Stress Tensor Using Focal Mechanism Data: Application to the San Fernando Earthquake Sequence[J]. J Geophys Res, 1984, 89(B11): 9305-9320.
- [17] 杜兴信, 邵辉成. 由震源机制解反演中国大陆现代构造应力场[J]. 地震学报, 1999, 21(4): 354-360.
DU Xing-xin, SHAO Hui-cheng. Modern Tectonic Stress Field in the Chinese Mainland Inversed from Focal Mechanism Solutions[J]. Acta Seismologica Sinica, 1999, 21(4): 354-360. (in Chinese)
- [18] 崔效锋, 谢富仁. 利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究[J]. 地震学报, 1999, 21(5): 513-521.
CUI Xiao-feng, XIE Fu-ren. Preliminary Research to Determine Stress Districts From Focal Mechanism Solutions in Southwest China and Its Adjacent Area[J]. Acta Seismologica Sinica, 1999, 21(5): 513-521. (in Chinese)
- [19] 马文涛, 徐锡伟, 徐平, 等. 地震三角形分类图解法与华北地区地震成因分析[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2): 379-385.
MA Wen-tao, XU Xi-wei, XU Ping, et al. The Method of Triangle Seismic Classify and Analysis on the Seismic Cause in the Northern China[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(2): 379-385. (in Chinese)
- [20] 王盛泽, 高国英. 新疆及邻近地区现代构造应力场的区域特征[J]. 地震学报, 1992, 14(增刊): 612-620.
WANG Sheng-ze, GAO Guo-ying. The Regional Characteristics of Tectonic Stress Field in Xinjiang and Adjacent Regions[J]. Acta Seismologica Sinica, 1992, 14(Supp): 612-620. (in Chinese)
- [21] 高国英, 温和平, 聂晓红. 1991—2002 年新疆中强震震源机制解分析[J]. 地震, 2005, 25(1): 81-87.
GAO Guo-ying, WEN He-ping, NIE Xiao-hong. Analysis of Focal-mechanism Solution of Moderately Strong Earthquakes in Xinjiang from 1991 to 2002[J]. Earthquake, 2005, 25(1): 81-87. (in Chinese)
- [22] 高国英, 聂晓红, 龙海英. 近期新疆震源机制解与地震活动特征研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(1): 57-63.
GAO Guo-ying, NIE Xiao-hong, HONG Hai-ying. Research on the Characteristics of Recent Focal Mechanism Solution and Seismic Activity in Xinjiang Area[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1): 57-63. (in Chinese)
- [23] 李莹甄, 唐兰兰. 新疆中强地震序列特征参数与主震震级的统

- 计关系[J].内陆地震,2010,24(4):307-314.
- LI Ying-zhen, TANG Lan-lan. Statistical Relation between the Characteristics Parameters of Mid-strong Earthquakes Sequence and the Main Shock Magnitude [J]. Inland Earthquake, 2010, 24(4): 307-314. (in Chinese)
- [24] 蒋海昆,代磊,侯海峰,等.余震序列性质判定单参数判据的统计研究[J].地震,2006,26(3):17-25.
- JIANG Hai-kun, DAI Lei, HOU Hai-feng, et al. Statistic Study on the Criterion Index for Classification of Aftershock Sequences[J]. Earthquake, 2006, 26(3): 17-25. (in Chinese)
- [25] Mogi K. Some Discussions on Aftershocks, Foreshocks and Earthquake Swarms——The Fracture of a Semi-infinite Body Caused by Inner Stress Origin and Its Relation to the Earthquake Phenomena (3)[J]. Bull Earthq Res Inst Univ Tokyo, 1963, 41: 615-658.
- [26] Chen Y T, Knopoff L. Similation of Earthquake Sequences[J]. J Geophys Res, 1987, 91: 693-703.
- [27] Aki K. Asperities, Barriers, Characteristic Earthquake and Strong Motion Prediction[J]. J Geophys Res, 1984, 89(B7): 5867-5872.
- [28] 蒋海昆,李永莉,曲延军,等.中国大陆中强地震序列类型的空间分布特征[J].地震学报,2006,28(4):389-398.
- JIANG Hai-kun, LI Yong-li, QU Yan-jun, et al. Spatial Distribution Features of Sequence Types of Moderate and Strong Earthquakes in Chinese Mainland[J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 28(4): 389-398. (in Chinese)
- [29] 郑剑东. 青藏高原西北缘地球动力学初探[J].地震地质, 1996, 18(2): 199-127.
- ZHENG Jian-dong. Preliminary Study on Geodynamics of the Northwestern Edge of the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau [J]. Seismology and Geology, 1996, 18(2): 199-127. (in Chinese)
- [30] 徐锡伟,谭锡斌,吴国栋,等.2008 年于田 $M_s7.3$ 地震地表破裂带特征及其构造属性讨论[J].地震地质,2011(2):462-471.
- XU Xi-wei, TAN Xi-bin, WU Guo-dong, et al. Surface Rupture Features of the 2008 Yutian $M_s7.3$ Earthquake and Its Tectonic Nature[J]. Seismology and Geology, 2011(2): 462-471. (in Chinese)
- [31] 陈正乐,鲁克改,王果,等.天山两侧山前新生代构造变形特征及其成因刍议[J].地学前缘,2009,16(3):149-159.
- CHEN Zheng-le, LU Ke-gai, WANG Guo, et al. Characteristics of the Cenozoic Deformation in Basin/Range Coupling Regions on Both Sides of Tianshan Mountains and Its Geodynamics[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3): 149-159. (in Chinese)
- [32] 尹光华,蒋靖祥,张勇,等.新疆尼勒克 1812 年地震断层构造特征[J].西北地震学报,2002,24(2):183-186.
- YIN Guang-hua, JIANG Jing-xiang, ZHANG Yong, et al. The Character of Seismic Fault of 1812 Nileke Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2002, 24(2): 183-186. (in Chinese)
- [33] 罗炬,李志海,王海涛.天山中东段地震层析成像的初步研究[J].地震工程学报,2014,36(1):107-169.
- LUO Ju, LI Zhi-hai, WANG Hai-tao. A Preliminary Study on Seismic Tomography in Mid-erstern Segment of Tianshan Mountain[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1): 107-169. (in Chinese)
- [34] 王琪,丁国瑜,乔学军,等.用 GPS 研究南天山(伽师)地区现今地壳变形[J].地震学报,2000(3):263-270.
- WANG Qi, DING Guo-yu, QIAO Xue-jun, et al. Research on Present Crustal Deformation in the Southern Tianshan (Jiashi), China by GPS Geodesy [J]. Acta Seismologica Sinica, 2000(3): 263-270. (in Chinese)
- [35] 杨卓欣,赵金仁,张先康,等.伽师强震群区上地壳三维速度层析成像[J].地震学报,2002,24(2):153-161.
- YANG Zhuo-xin, ZHAO Jin-ren, ZHANG Xian-kang, et al. Tomographic Determination of the Upper Crustal Structure in Jiashi Strong Earthquake Swarm Region[J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(2): 153-161. (in Chinese)
- [36] 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(4):317-325.
- ZHAO Jin-ren, ZHANG Xian-kang, ZHANG Cheng-ke, et al. The Detection and Research of the Deep Crust Tectonic Characters at the Jiashi—Artux Seismic Region[J]. Earthquake Research in China, 2002, 18(4): 317-325. (in Chinese)