



## 内蒙古通辽 5.3 级地震序列特征及发震背景分析<sup>①</sup>

裴惠娟<sup>1</sup>, 韩晓明<sup>2</sup>, 张帆<sup>2</sup>, 胡博<sup>2</sup>, 陈文凯<sup>3</sup>

(1.中国科学院兰州文献情报中心,甘肃兰州 730000; 2.内蒙古自治区地震局,内蒙古呼和浩特 010010;  
3.中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000)

**摘要:**2013 年 4 月 22 日在赤峰—开原断裂中段发生了内蒙古通辽 5.3 级地震,对我国华北和东北地区的地震形势产生双重影响。基于  $K$  值、 $G-R$  关系、能量释放比例  $R_E$  和  $M-T$  等指标判定通辽 5.3 级地震为主震-余震型。根据 1900 年以来东北地区中强地震时空演化规律分析认为,大兴安岭和松辽盆地 5 级以上地震具有基于时间相依的空间对跳现象,通辽 5.3 地震是继 2008 年 6 月 10 日阿荣旗与鄂伦春交界 5.2 级地震之后,对跳发生于松辽盆地东南边缘的一次中强地震;对比东北地区以往震例分析认为,通辽 5.3 级地震既具有符合历史统计规律的普遍性,又具有不同于历史统计规律的特殊性。根据 2011 年 3 月 11 日日本东海岸 9.0 级强震前后东北地区中等以上地震的时空演化特征分析认为,海拉尔盆地及大兴安岭过渡带、环渤海地区至开鲁盆地的“菱形”区域是日本 9.0 级地震之后我国东部地区响应最为强烈的地区。由于同时受到日本 9.0 级地震和鄂霍次克海 8.2 级深震前所未有的双重影响,2013 年东北地区的松辽盆地史无前例的发生了 8 次 5 级以上中强地震,未来东北地区很可能将重启新的地震活动格局。

**关键词:**赤峰—开原断裂;通辽 5.3 级地震;序列特征;地震定位;地震形势

**中图分类号:** P315.63

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2015)01-0242-06

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0242

## Analysis of Sequence Characteristics and Occurrence Background of the Tongliao M5.3 Earthquake

PEI Hui-juan<sup>1</sup>, HAN Xiao-ming<sup>2</sup>, ZHANG Fan<sup>2</sup>, HU Bo<sup>2</sup>, CHEN Wen-kai<sup>3</sup>

(1.Lanzhou Library of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2.Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China;

3.Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** It is generally known that the Chifeng—Kaiyuan fault functions as the boundary between the North China Block and Northeast Block. On April 22, 2013, the Tongliao M5.3 earthquake occurred in the central segment of the Chifeng—Kaiyuan fault, and thus, it exerted dual influence on the occurrence background in North and Northeast China. This earthquake was determined to be of mainshock-aftershock type based on the results of indicators such as the  $K$  value,  $G-R$  relationship, energy release rate  $R_E$ , and  $M-T$ . An analysis of the space-time evolution regularities of moderately strong earthquakes in Northeast China since 1900, presented in this paper, shows that earthquakes  $> M 5.0$  in Greater Khingan and the Songliao Basin are time-dependent and space-alternating events. Following the Arun-Oroqen border M5.3 earthquake of 2008, the Tongliao M5.3 earthquake occurred in the southeastern edge of the Songliao Basin as a moderately strong earthquake. Further comparative studies with past earthquakes in North-

① 收稿日期:2014-05-23

基金项目:中国地震局兰州地震研究所地震科技发展基金项目(2013M01);地震科技星火计划项目(XH15010Y);2012 年内蒙古自治区科技厅应用技术研究与开发项目

作者简介:裴惠娟(1982—),女(汉族),青海乐都人,助理研究员,主要从事自然灾害应对战略情报研究.E-mail: peihj@llas.ac.cn

通讯作者:韩晓明(1980—),男,高级工程师,主要从事测震学分析预报方法研究。

east China have shown that this earthquake has both generality and particularity. The space-time evolution regularities of moderate and strong earthquakes in Northeast China, both before and after the 2011 Japan  $M_{9.0}$  magnitude earthquake, indicates that compared with other areas of Northeast China, the diamond-shaped area between the Hailaer Basin, Greater Hinggan transition zone, circum-Bohai region, and the Kailu Basin responded most strongly to the 2011 Japan  $M_{9.0}$  earthquake. Influenced by the Okhotsk  $M_{8.2}$  and Japan  $M_{9.0}$  earthquakes, more than eight  $M_{5.0}$  earthquakes occurred in the Songliao Basin in 2013. This article concludes that a new pattern of seismic activity is likely to start in Northeast China in the future.

**Key words:** Chifeng—Kaiyuan fault; Tongliao  $M_{5.3}$  earthquake; sequence characteristics; earthquake location; earthquake situation

## 0 引言

赤峰—开原断裂横贯内蒙古、辽宁、吉林三省,大部在内蒙古境内,走向近 EW,延伸近 1 400 km,是我国东北和华北地区的一条重要断裂带。从某种意义上讲,赤峰—开原断裂是内蒙古和辽宁交界最为重要的一个断裂,也是我国东北和华北地区的一条标志性分界断裂。在进行地震活动分析和地震趋势判定时,根据地震活动和地质构造特征将赤峰—开原断裂作为东北地震区和华北地震区的分界线。主要依据如下:(1)根据马杏垣<sup>[1]</sup>的大地构造、新构造、现今地壳应力状态和板内块体的现代运动等研究成果,将赤峰—开原断裂南北分别划入华北块体和东北块体。(2)赤峰—开原断裂一线存在一个显著的岩石圈厚度变异带,地壳厚度和岩石圈厚度比值分布图也揭示了开原—赤峰一线为我国东北和华北两个构造块体的分界线,以北地区为东北块体,南部则划为华北块体<sup>[3-4]</sup>。(3)赤峰—开原断裂北侧地震活动特征和南侧存在显著差异。相对于断裂南侧,北侧的中强地震突发性强,少有前震序列,且余震序列数量较少。

鉴于赤峰—开原断裂的特殊位置,发生在该断裂的中强地震亦具有一定的特殊性和重要的研究价值,开展赤峰—开原断裂带的中强地震研究,能够同时为东北地区和华北地区的地震形势判定提供科学依据。地震活动背景是衡量一个区域地壳活动水平的重要标志,也是进行地震序列类型分析前的一项重要基础工作<sup>[5]</sup>。本文以 2013 年 4 月 22 日通辽 5.3 级地震作为研究对象,着重阐述东北地区地震活动背景、通辽 5.3 级地震序列类型判定、序列统计特征等内容,尽可能全面展示地震活动方面的详细信息,以期为华北和东北地区未来的地震形势判定提供有益参考。

## 1 地震概况

2013 年 4 月 22 日 17 时 11 分,内蒙古通辽科尔沁左翼后旗( $N42.9^{\circ}$ 、 $E122.4^{\circ}$ )发生  $M_{5.3}$  地震,震中位于 NNE 向的锦州—阜新断裂与 EW 向的赤峰—开原断裂交汇区域,即松辽盆地的西南角和开鲁盆地南边界;该区地质构造发育、中强地震频发,根据中国地震目录(中国地震局监测预报司预报管理处整编,2010 年 6 月),有历史地震记录以来震中周围 150 km 范围内共发生  $M_{5.0}$  以上地震 8 次(图 1),其中:记载最早的地震是 1318 年辽宁阜新 5.0 级地震,距本次 5.3 地震约 41.5 km;时间和空间距离最近的地震是 1942 年

7 月 9 日内蒙古通辽 6.0 级地震,距本次地震约 35 km。这些中强地震大致分布在赤峰—开原断裂两侧,并顺延众多北东向断裂形成有序分布。赤峰—开原断裂横贯内蒙古和辽宁交界,由西至东分别与八里罕断裂、北票—朝阳断裂、锦州—阜新断裂、长春—四平断裂等一系列北东向断裂相交,形成了蒙辽交界地区独有的“枝干型”断裂系,为蒙辽交界历史及现代中强地震的发生提供了有利地质构造条件。

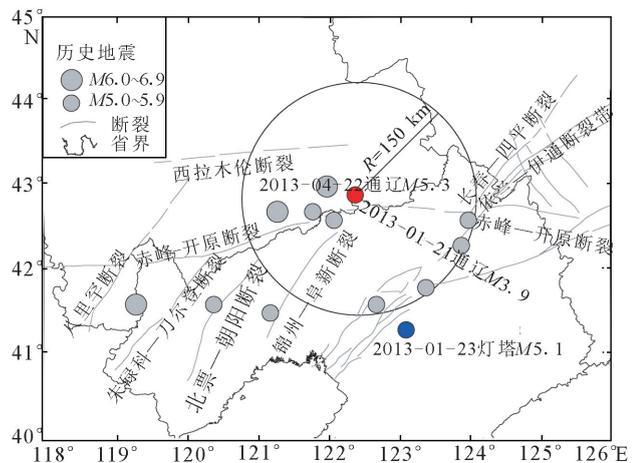


图 1 通辽 5.3 级地震震中区地质构造和历史地震分布

Fig.1 Geological structure and distribution of historical earthquakes in epicentral region of the Tongliao  $M_{5.3}$  earthquake

## 2 地震序列及地震类型

### 2.1 地震序列时空分布

根据内蒙古测震台网测定,截止 2013 年 5 月 14 日,本次  $M_{5.3}$  ( $M_{L}5.7$ ) 地震共记录到余震 74 次,其中  $M_{L}4.0 \sim 4.9$  地震 1 次、 $M_{L}3.0 \sim 3.9$  地震 12 次、 $M_{L}2.0 \sim 2.9$  地震 39 次、 $M_{L}1.0 \sim 1.9$  地震 22 次,最大余震  $M_{L}4.2$ 。

从频度和震级统计图看(图 2),地震集中发生于 4 月 22 日至 26 日,其后的个别时段由于发生较大余震表现出一定的起伏变化,但地震序列的整体衰减态势逐渐明朗;震级分布集中于  $M_{L}1.8 \sim 2.8$  之间,无  $M_{S} \geq 4.0$  余震发生。

双差定位(hypoDD)结果显示,本次通辽 5.3 级地震序列呈 NW 向展布,延伸约 10 km,余震分布于主震两侧,表现出双侧破裂特征,且  $M_{L} \geq 3.0$  地震集中发生于主震南部呈 NEE 向分布。从地震序列的时序发展情况看,4 月 22—23 日(5.3 级主震发生当天及次日)发生的余震次数为 22 次,约

占序列总地震数目的35%,且大部分集中分布于主震NW方向;4月23日之后发生的余震则主要分布于主震南侧和东南部,余震空间分布以主震发生时间为界形成鲜明对比,反映了震中区的应力场随着时间推移而产生的方向性变化(图3)。

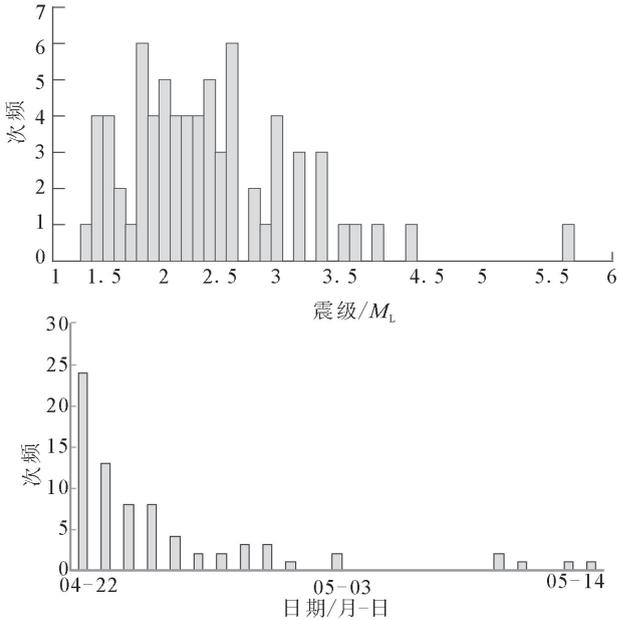


图2 震级-频度统计和每日地震频度统计

Fig.2 Statistics of magnitude-frequency and daily earthquake frequency

## 2.2 地震类型判定

截止2013年6月10日,通辽5.3地震基本处于能量释放末期,序列衰减态势显著,余震活动趋于结束,可以利用能量释放比例进行地震序列类型判定。通常以主震释放能量占全序列地震释放能量总和的比例  $R_E$  进行判定:  $R_E \geq 99.99\%$  为孤立型,  $R_E < 90\%$  为震群型或双震型,  $90\% \leq R_E < 99.99\%$  为主余型<sup>[9]</sup>。

从序列能量累积释放时序曲线看(图4),主震发生当天及次日能量累积释放呈直线上升趋势,之后发生的几次较强余震又出现小幅骤升现象,5月10日以后能量释放逐渐减弱并趋于平稳,与地震时序分布形成同步变化特征。主震释放能量占全序列释放总能量的比例为99.49% ( $R_E = E_{\pm} / \sum E = 99.49\%$ ),结合主震与最大余震震级差 ( $\Delta M = M_L 1.5$ ),综合判定认为通辽5.3地震为主震-余震型。

## 3 发震背景讨论

### 3.1 区域地震活动背景

统计结果显示,大兴安岭和松辽盆地的5级以上中强地震在时序上存在着明显的前后对应关系,每次对应完成一次地震活跃时段或联动过程。从1900年至2013年完成了5次联动,规律比较明显(图5、表1)。2008年6月10日鄂伦春与阿荣旗交界发生  $M_S 5.2$  地震,根据前四次的对应规律,每个活动期均以松辽盆地的中强地震作为结束地震。2013年1月23日沈阳灯塔5.1级地震和2013年4月22日通辽

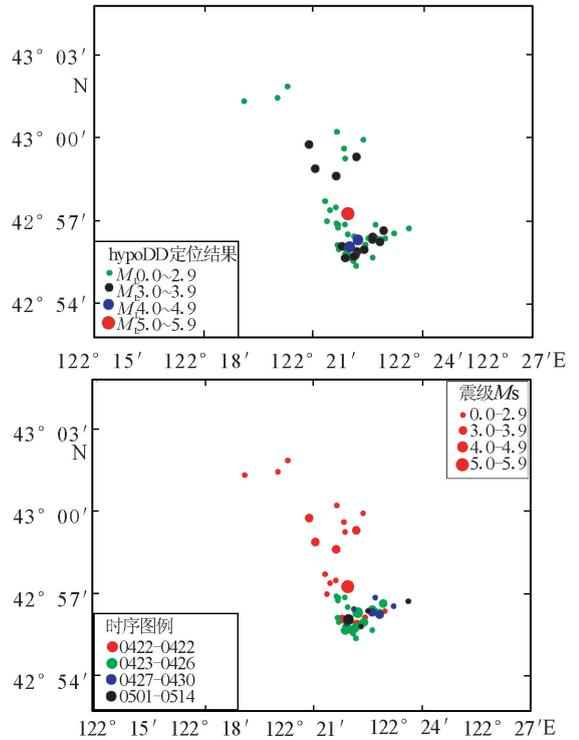


图3 通辽5.3地震序列重新定位结果

Fig.3 The relocation of earthquake sequence of Tongliao  $M_{5.3}$  earthquake

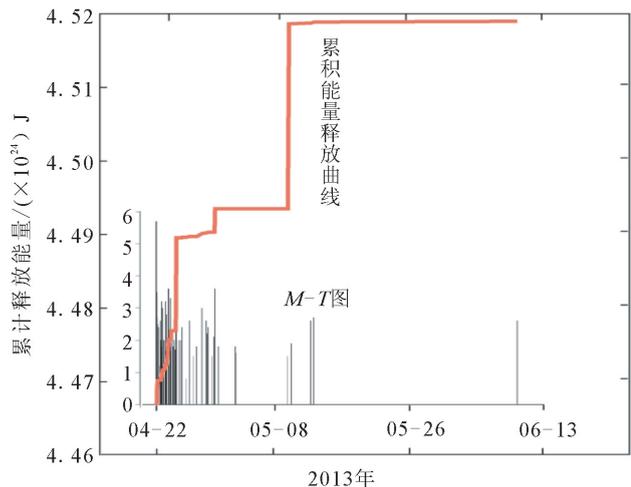


图4 通辽5.3级地震累积能量释放和地震时序分布叠加曲线

Fig.4 The accumulative energy release and the seismic temporal distribution curves of Tongliao  $M_{5.3}$  earthquake

5.3级地震的发生再次验证了大兴安岭和松辽盆地中强地震的联动对跳规律。同时也表明通辽5.3级地震是在东北地区5级以上地震的时空联动背景下发生的。

### 3.2 外围动力学背景

在很多研究者认为东北地区第五活跃期即将结束时<sup>[14-15]</sup>,日本东海岸发生了9.0级地震,势必对东北地区所

处的地球动力学环境和区域应力状态产生较大影响,具体到地震活动变化则主要体现在如下三个方面:(1)日本 9.0 地震的发生,加速了东北地区的应力调整过程,使区域应力状态失衡,深震区首当其冲成为应力触发的前沿区域,导致 E125°~130°、N43°~48° 范围内的中等地震空区随即被打破,2 个月后于空区东部边缘发生了 2011 年 5 月 10 日珲春 M<sub>S</sub>6.1 深震(图 6);(2)原本地震活动水平较低的内蒙古陈巴尔虎旗—海拉尔—牙克石一带接连发生 8 次 M<sub>L</sub>≥4.0 地震(图 6、表 2),短期地震活动现状与地震活动背景显著失

配,异常较为明显。该区隶属海拉尔盆地,外围区域则属于海拉尔盆地至大兴安岭隆起的过度地带,自有地震记录以来没有发生过 M<sub>S</sub>5.0 以上地震,最大地震是 1979 年 2 月 6 日新巴尔虎旗 M<sub>S</sub>4.9 地震,2011 年以来发生的这 8 次中等以上地震可以视为该区域的地震活动显著增强异常。已有研究表明,日本 9.0 级地震主要产生显著的近场震后效应<sup>[17]</sup>,对中国大陆的影响整体表现为震后松弛<sup>[18]</sup>,而对我国东北和华北地区北东向断裂则主要产生显著的震后库伦应力加载效应<sup>[19]</sup>,海拉尔盆地内部北东向展布的呼伦湖断裂同样

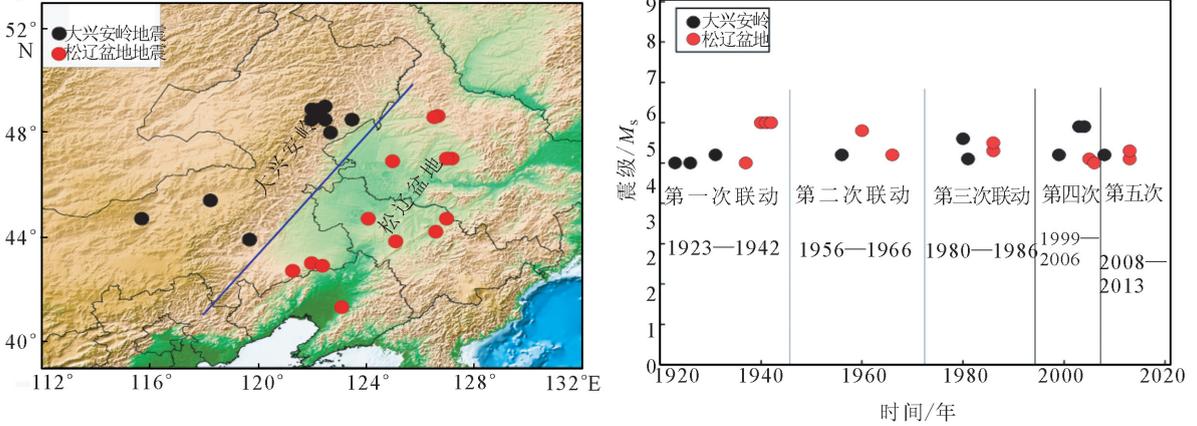


图 5 1900 年以来大兴安岭和松辽盆地 5 级以上地震时空分布特征

Fig.5 The temporal and spatial distribution characteristics of  $M \geq 5.0$  earthquakes in Da Hinggan Mountains and Songliao Basin since 1900

表 1 1900 年以来大兴安岭和松辽盆地 5 级以上中强地震对应关系

Table 1 The corresponding relation of the moderate-strong earthquakes of  $M \geq 5.0$  in Da Hinggan Mountains and Songliao Basin since 1900

序号	地震时间	震级	发震位置	所属区域	序号	地震时间	震级	发震位置	所属区域
1	1923-10-15	5.0	布特哈旗	大兴安岭	13	1981-04-26	5.1	博克图	大兴安岭
2	1926-10-28	5.0	布特哈旗	大兴安岭	14	1986-03-01	5.3	德都	松辽盆地
3	1931-06-30	5.25	阿荣旗北	大兴安岭	15	1986-08-16	5.5	德都	松辽盆地
4	1937-06-11	5.0	吉林市北	松辽盆地	16	1999-01-29	5.2	锡林浩特北	大兴安岭
5	1940-01-19	6.0	库伦旗西	松辽盆地	17	2003-08-16	5.9	巴林左旗	大兴安岭
6	1941-05-05	6.0	绥化	松辽盆地	18	2004-03-24	5.9	东乌珠穆沁旗	大兴安岭
7	1942-07-09	6.0	通辽	松辽盆地	19	2005-07-25	5.1	林甸	松辽盆地
8	1942-09-02	6.0	绥化北	松辽盆地	20	2006-03-31	5.0	乾安	松辽盆地
9	1956-10-14	5.25	扎兰屯西北	大兴安岭	21	2008-06-10	5.2	阿荣旗	大兴安岭
10	1960-04-13	5.8	吉林榆树	松辽盆地	22	2013-01-23	5.1	沈阳灯塔	松辽盆地
11	1966-10-02	5.2	吉林怀德	松辽盆地	23	2013-04-22	5.3	通辽	松辽盆地
12	1980-02-10	5.6	博克图	大兴安岭	24	?	?	?	?

表 2 2011 年以来海拉尔盆地及周边 M<sub>L</sub>≥4.0 级地震

Table 2 Earthquakes of  $M_L \geq 4.0$  in Hailer Basin since 2011

序号	地震时间	地震位置		震级/M <sub>L</sub>	深度/km	地点
		经度/(°)	纬度/(°)			
1	2011-07-22	118.82	49.73	4.7	7	内蒙古陈巴尔虎旗
2	2012-04-18	121.98	48.18	4.4	5	内蒙古牙克石
3	2012-12-09	117.37	48.99	4.2	10	内蒙古新巴尔虎右旗
4	2013-02-20	124.94	50.95	4.1	7	内蒙古鄂伦春自治旗
5	2013-05-14	122.71	49.23	4.9	8	内蒙古鄂伦春自治旗
6	2013-05-29	116.23	47.96	4.3	8	内蒙古新巴尔虎右旗
7	2013-06-20	125.18	49.76	5.3	7	内蒙古莫力达瓦自治旗
8	2013-06-27	116.50	47.73	4.3	11	新巴尔虎右旗与蒙古交界

受到显著的应力加载作用,因此,近期海拉尔盆地出现的中等地震增强活跃很可能是日本 9.0 级地震的震后应力触发所致。(3) 日本 9.0 级地震后,环渤海及外围地区形成“菱形”中等地震增强活跃区域,并在  $M_L \geq 4.0$  地震持续活跃过程中发生一系列 5 级以上中强地震(表 3),而该区域也恰恰处于日本 9.0 级地震后库伦应力增加的北东向展布的郯庐断裂带中北段及附近位置(图 6)。

表 3 2013 年以来大环渤海地区  $M_S \geq 5.0$  地震参数

Table 3 Seismic parameters of earthquakes of  $M_S \geq 5.0$  in the large Bohai rim since 2013

地震时间	地震位置		震级/ $M_S$	深度/km	地点
	经度/(°)	纬度/(°)			
2013-01-21	123.12	41.30	5.1	10	辽宁灯塔
2012-04-21	124.60	35.20	5.0	10	黄海海域
2012-04-22	122.40	42.90	5.3	6	内蒙古通辽
2013-05-18	124.70	37.70	5.1	8	黄海海域

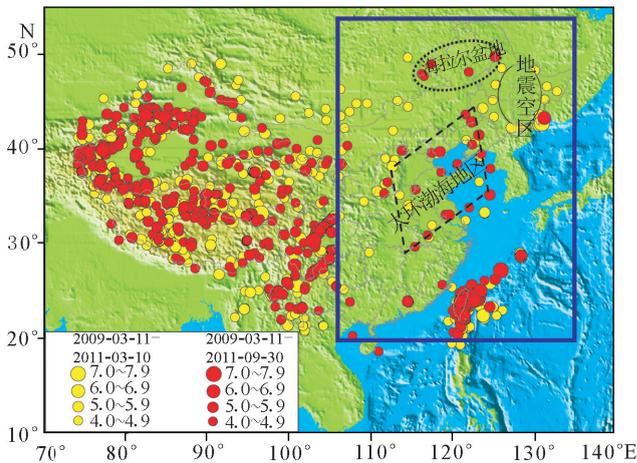


图 6 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级地震前后  $M_L \geq 4.0$  地震分布

Fig.6 Distribution of  $M_L \geq 4.0$  earthquakes before and after the Japan M9.0 earthquake on March 11, 2011

## 4 结论和讨论

(1) 赤峰—开原断裂是我国华北块体和东北块体的分界线,2013 年 4 月 22 日通辽 5.3 级地震发生在赤峰—开原断裂中段,发震位置特殊,对东北地区和华北地区的地震活动格局都将产生一定的影响。

(2) 通辽 5.3 级地震的普适性:通辽 5.3 级地震序列特征符合区域历史震例统计规律,余震活动持续时间短、数目较少,原因在于松辽盆地周边比较破碎,不易积累太大能量,能量释放规模小、周期短,余震次数相对较少。

(3) 通辽 5.3 级地震的特殊性:通辽 5.3 级地震与东北历史地震活动统计规律略有不同,表现出一定的特殊性,东北地区以往震例少有前震或信号震发生,而通辽 5.3 级地震之前 3 个月原地曾发生 2013 年 1 月 21 日  $M_S 3.9$  地震,应属通辽 5.3 级地震的前震或信号震。

(4) 通辽 5.3 级地震是在东北地区大兴安岭和松辽盆地两大构造块体中强地震完成第五次联动对跳过程中发生的,这为依据此规律对东北地区未来地震形势判定提供了新的震例。

(5) 沈阳灯塔 5.1 级地震和通辽 5.3 级地震的关系。根据国内众多学者的研究结论<sup>[10-11,13]</sup>,类似赤峰开原断裂这种“枝干型”的构造形式存在多组断裂交汇,较易孕育双震型或多震型序列,而且在历史上确曾发生过双震型震例,1940 年 1 月 19 日通辽库伦发生 6.0 级地震之后,在其东北方约 66 km 处发生 1942 年 7 月 9 日通辽 6.0 级地震,这两次地震同属于同一构造单元开鲁盆地,虽然时间跨度近 2 年半,但空间成对特征显著。2013 年 1 月 23 日辽宁灯塔 5.1 级地震和 4 月 22 日通辽 5.3 级地震空间相距 170 km,时间相距 89 天,空间成对较为勉强,时间成对尚有可能。如果沈阳灯塔 5.1 级地震不是通辽 5.3 级地震的空间成对地震,根据众多研究者总结的断裂构造展布与地震类型的对应关系,该区域具备发生多震型地震的地质构造条件,那么通辽 5.3 级地震之后赤峰开原断裂应该还具有再次发生 5 级左右中强地震的可能性。

(6) 目前,东北地区处于来自太平洋板块的日本海沟 9.0 级巨震和北美板块鄂霍次克海 8.2 级最大深震的共同影响下,这在东北地区的地震活动历史上从未发生过;同样罕见的是,2013 年 10 月 31 日至 11 月 23 日,吉林前郭连发 5 次  $M_S \geq 5.0$  地震,最大震级  $M_S 5.8$ 。由此分析认为,东北地区未来的地震活动很可能打破原有的统计规律而产生新的活动格局,未来的地震形势将复杂而严峻。

致谢:感谢审稿专家提供的修改建议;文中地形图均由 GMT 程序包绘制完成;作者在此一并致谢。

## 参考文献(References)

- [1] 马杏垣,等.中国岩石圈动力学图集[M].北京:中国地图出版社,1989.  
MA Xing-yuan, et al. Lithospheric Dynamics Atlas of China [M]. Beijing: Sinomap Press, 1989. (in Chinese)
- [2] 卢造勋.东北地区的深部构造与地震[J].长春地质学院学报, 1983(1):113-121.  
LU ZAO-xun. The Deep-seated Structures and the Earthquakes in Northeast China[J]. Journal of Changchun College of Geology, 1983, (1): 113-121. (in Chinese)
- [3] 卢造勋,蒋秀琴,潘科,等.中朝地台北缘地区的地震层析成像[J].地球物理学报,2002,45(3):338-351.  
LU ZAO-xun, JIANG Xiu-qin, PAN Ke, et al. Seismic Tomography in The Northeast Margin Area of Sino-korean Platorm [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45 (3): 338-351. (in Chinese)
- [4] 孟宪森,关玉辉,姜锦华.开原—赤峰断裂两侧地震序列活动的差异[J].东北地震研究,2006,23(2):22-29.  
MENG Xian-sen, GUAN Yu-hui, JIANG Jin-hua. Difference of The Earthquake Sequences Activity on The Both Sides of Kaiyuan—Chifeng Fault [J]. Seismological Research of

- Nprthan, 2006, 23(2): 22-29. (in Chinese)
- [5] 韩志军, 王桂兰, 周成虎, 等. 地震序列研究现状与研究方向探讨[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 74-78.  
HAN Zhi-jun, WANG Gui-lan, ZHOU Cheng-hu, et al. A Review and Discussion Earthquake Sequence Research[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 74-78. (in Chinese)
- [6] 国家地震局预测预防司. 测震学分析预报方法[M]. 北京: 地震出版社, 1997.  
The State Seismological Bureau of the Department of Prediction and Prevention. Analysis of Seismometry Prediction Method[M]. Beijing: Seismological Press, 1997. (in Chinese)
- [7] 刘正荣. 刘正荣地震预报方法[M]. 北京: 地震出版社, 2004.  
LIU Zheng-rong. LIU Zheng-rong Earthquake Prediction Method[M]. Beijing: Seismological Press, 2004. (in Chinese)
- [8] 周蕙兰, 房桂荣, 章爱娣, 等. 地震震型判断方法探讨[J]. 西北地震学报, 1980, 2(2): 45-59.  
ZHOU Hui-lan, FANG Gui-rong, ZHANG Ai-di, et al. Methods to Investigate the Earthquake Type Judgment[J]. Northwestern Seismological Journal, 1980, 2(2): 45-59. (in Chinese)
- [9] 王华林, 周翠英, 耿杰, 等. 中国大陆及邻区地震序列类型的分区特征和震源环境讨论[J]. 地震, 1997, 17(1): 34-42.  
WANG Hua-lin, ZHOU Cui-ying, GENG Jie, et al. Discussion on Zoning Features of Earthquake Sequence Type and Source Environment in Chinese Mainland and its Adjacent Area[J]. Earthquake, 1997, 17(1): 34-42. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 吴开统, 焦远碧, 吕培苓, 等. 地震序列概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1980: 97-114.  
WU Kai-tong, JIAO Yuan-bi, LV Pei-ling, et al. An Introduction to the Earthquake Sequence[M]. Beijing: Peking University Press, 1980: 97-114. (in Chinese)
- [12] 周翠英, 侯海峰, 华爱军, 等. 山东及近海区地震序列类型地理分布特征[J]. 华北地震科学, 2001, 19(3): 15-27.  
ZHOU Cui-ying, HOU Hai-feng, HUA Ai-jun, et al. The Geographic Distribution Feature of Earthquake Sequence Type in Shandong and its Offshore Area[J]. North China Earthquake Sciences, 2001, 19(3): 15-27. (in Chinese)
- [13] 赵文峰. 东北大陆未来十年地震危险形势的估计[J]. 东北地震研究, 1985, 1(1): 3-14.  
ZHAO Wen-feng. Estimation of the Earthquake Danger of the Northeast China in the Next Decade[J]. Seismological Research of Northeast China, 1985, 1(1): 3-14. (in Chinese)
- [14] 于龙伟. 东北中强震和强震的时空分布特征[J]. 东北地震研究, 1987, 3(1): 11-22.  
YU Long-wei. Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Moderate Earthquakes and Strong Earthquake in Northeast China[J]. Seismological Research of Northeast China, 1987, 3(1): 11-22. (in Chinese)
- [15] 高立新. 中国松辽盆地构造环境及东北地区地震活动特征分析[J]. 地震, 2008, 28(4): 59-67.  
GAO Li-xin. Structural Environment of Songliao Basin and Characteristics of Seismic Activity in Northeast China Region[J]. Earthquake, 2008, 28(4): 59-67. (in Chinese)
- [16] 孙文斌, 和跃时. 中国东北地区地震活动特征及其与日本海板块俯冲的关系[J]. 地震地质, 2004, 26(1): 122-132.  
SUN Wen-bin, HE Yue-shi. The Feature of Seismicity in Northeast China and its Relation to the Subduction of the Japan Sea Plate[J]. Seismology and Geology, 2004, 26(1): 122-132. (in Chinese)
- [17] SHAO Zhi-gang, ZHAN Wei, ZHANG Lang-ping, et al. Analysis of the Far-field Cos and Post-seismic Response Caused by the 2011  $M_w$  9.0 Japan Earthquake Inferred from GPS Observations[J]. Pure and Applied Geophysics. (to Be Published).
- [18] 孙玉君, 董树文, 范桃园, 等. 从同震和震后形变分析日本东北  $M_w$  9.0 级大地震对近场地震活动性的影响[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(3): 1131-1139.  
SUN Yu-jun, DONG Shu-wen, FAN Tao-yuan, et al. The Effect of Tohoku  $M_w$  9.0 Earthquake on the Near-field Seismic Activity From the Coseismic and Postseismic Deformation[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(3): 1131-1139. (in Chinese)
- [19] Wessel P, Smith W M F. New, Improved Version of Generic Mapping Tools Released[J]. EOS Trans, 1998, 79(4): 579.