

王霞、宋美琴,2017,大同窗地震活动频次和应变能特征,中国地震,33(2),328~337。

# 大同窗地震活动频次和应变能特征

王霞 宋美琴

山西省地震局,太原市晋祠路二段69号 030021

**摘要** 通过对大同地震活动窗自开启以来(1989年10月~2016年10月)的地震频次和应变能进行统计分析,发现大同窗的月频次衰减拟合结果呈现分段交替活动特征,可分为3个活跃时段和2个背景活动时段。当处在活跃时段时,山西和张渤这2个地震活动带的地震密集发生,但在正常背景活动时,2个地震带发生的地震则较少。应变能统计结果表明,鄂尔多斯块体周缘强震对大同窗的地震活动有较直接的影响,显示出强震的震级越大、与大同窗的距离越近,则大同窗出现应变能异常就越早、幅度也越大;另外,大同窗受青藏块体强震的影响较强,而受西太平洋板块俯冲的影响较弱;大同窗应变能在周边块体强震后的反应,可能与其所处的地质构造环境有关,因此对应力场的变化较敏感。

**关键词:** 大同窗 月频次 应变能

**[文章编号]** 1001-4683(2017)02-0328-10 **[中图分类号]** P315 **[文献标识码]** A

## 0 引言

地震窗是指某些能以微震活动形式灵敏反映区域应力场变化的特殊构造部位(敖雪明等,1998)。自20世纪70年代以来,我国的地震学家就陆续提出并开展了地震窗的研究工作(王泽皋等,1995;薛丁等,2012;夏瑞良,1984),所得结论是开窗后1~3个月(有的窗稍长一点),外围将有较大的或中强以上地震发生;地震频度的变化包含了丰富的地震前兆信息,具有较高短期预报效能(姜秀娥等,1982、1989;王泽皋,1986;王桂岭等,1987;苏鸾声,1997;王培玲等,2004;郑兆苾等,1999),这倍受广大分析预测人员的高度重视;也有的以应变能作为预测指标来反映地震窗对周边中强震的指示意义(缪鹏等,2014;王想等,2016)。近年来,围绕地震窗开展的工作已明显转向数字地震学方面的研究(陈宇卫等,2007;李发等,2013;洪德全等,2013;吕芳等,2013)。

1989年10月19日大同-阳高发生了6.1级地震,这是1815年以来山西地区最大的一次地震,且于1991年3月26日和1999年11月1日又在原地发生了5.8级和5.6级地震。自6.1级地震后该区域余震不断,作为1个余震“窗口”(下文简称“大同窗”图1),截至2016年10月窗口余震总数已达17679次,各震级的地震频次分别为0.0~0.9级13111次,1.0~1.9级3978次,2.0~2.9级439次,3.0~3.9级120次,4.0~4.9级23次,5.0~5.9级7次,6.0~6.9

**[收稿日期]** 2017-03-15; **[修定日期]** 2017-05-20

**[项目类别]** 2016年度震情跟踪青年课题(2016010114)、山西省地震局2016年科研项目(SBK-1608)共同资助

**[作者简介]** 王霞,女,1987年生,工程师,主要从事测震学及地震综合预报等研究工作。E-mail: 365372858@qq.com

宋美琴,通讯作者,女,1968年生,研究员,主要从事地震活动性、综合预报等研究。E-mail: smq28@126.com

级 1 次(图 2)。大同窗位于山西断陷带北部的大同盆地,处在活动断裂很发育的地区,在地震构造上位于华北北部的敏感部位。以往研究结果表明,其余震序列的日、月频度变化与山西地震带 4 级以上地震及张-渤地震带的中强地震活动对应较好(啜永清,1995、1999a;啜永清等,1999b),然而仅以频度来分析大同窗,难以很好地反映地震活动状态,尤其是地震能量释放特征。2015 年 5 月大同窗再次开窗,其地震月频次达 41 次,是 2014 年 3 月以来月均值的 2 倍以上,这次开窗是孕震过程的“窗口”效应? 还是“正常背景”的自身地震活动起伏? 或是受到周边强震的影响,值得深入思考。因此,本文对大同窗地震序列活动的衰减特征进行研究,以探索地震“应变能”的异常变化。

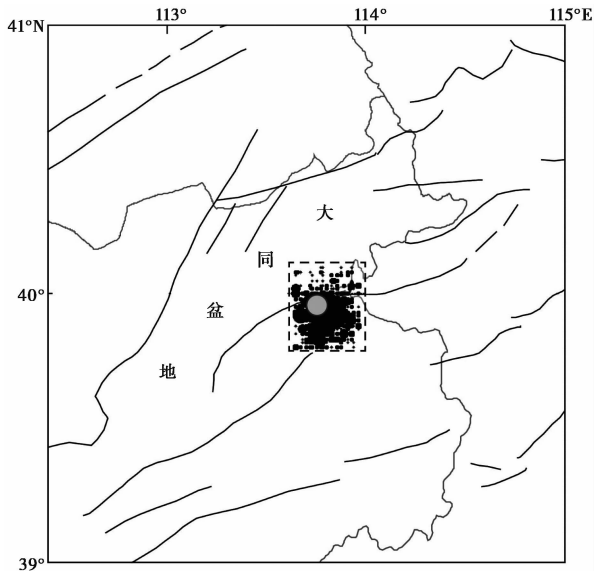


图 1 大同窗位置和小震分布  
图中虚线框为大同窗位置,框内灰色圆表示 1989 年大同阳高 6.1 级地震,黑色圆表示余震

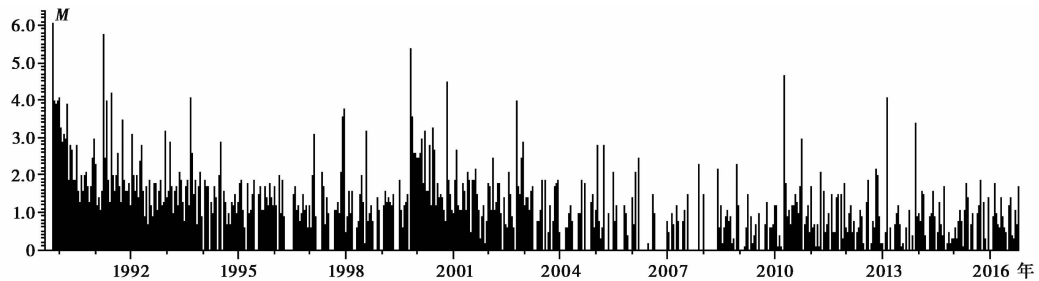


图 2 大同窗余震的  $M-t$  图

# 1 研究方法 with 资料

## 1.1 地震频度的幂函数衰减

在半对数坐标系上作出大同余震窗地震频度幂函数衰减曲线,并在曲线上同时绘出了



山西带和张渤带中强地震,以最大限度突出异常提取出震兆信息为原则来定出警戒线,凡频度增高超出警戒线的点均作为震兆信息,可参考文献王泽皋(1979)、王泽皋等(1989)。

作大同窗 1989 年 10 月 18 日~2016 年 10 月 31 日的地震的( $M_L \geq 0.0$  地震无漏记)拟合月频度衰减曲线,识别出正常背景活动时段和异常活跃时段,即在幂函数衰减的背景上所出现的异常峰值。

## 1.2 应变能计算

利用 Gutenberg 等(1956)的简化经验公式,根据震级计算地震释放能量(能量单位:J)

$$\lg E = 4.8 + 1.5M_s$$

以此计算地震释放应变能

$$\varepsilon = \sqrt{E}$$

对最小完整性震级以上的每一次地震计算其应变能,根据震例,从中提取应变能阈值线。

据大同窗 1989 年 10 月 18 日~2016 年 10 月 31 日的  $M_L \geq 0.0$  地震序列目录( $M_L \geq 0.0$  地震无漏记),表 1 给出了其中 4 次  $M_L \geq 5.0$  地震活动高潮时段的目录,对全时段目录计算  $M_L \geq 0.0$  地震的应变能,以 10 日累计 5 日滑动做出应变能时序曲线,然后进行幂函数衰减拟合。

表 1 大同窗 4 次  $M_L \geq 5.0$  地震活动统计

序号	活动高潮时段	主震日期 和震级 $M_L$	各级地震频次					
			0.0~0.9	1.0~1.9	2.0~2.9	3.0~3.9	4.0~4.9	$\geq 5$
1	1989-10-18~1990-03-31	1989-10-19(6.1)	5283	1748	228	70	12	6
2	1991-03-26~1991-04-30	1991-03-26(5.8)	914	342	40	12	2	1
3	1999-11-01~1999-12-31	1999-11-01(5.6)	734	356	41	8	1	1
4	2010-04-04~2010-04-30	2010-04-04(5.0)	255	19	1	1	0	1

## 1.3 目标地震选取

根据啜永清(1995、1999;啜永清等,1999)等研究结果,选取了 1989 年 10 月~2016 年 10 月山西地震带及华北北部  $M_L \geq 4.0$  地震共 57 个(图 3),作为本研究的目标地震。

# 2 结果分析

## 2.1 月频次衰减拟合

大同窗地震月频次的衰减拟合结果显示(图 4):幂函数衰减系数为 0.767,虚线拟合的频度异常阈值为  $n = 1331.8 t^{-0.7645}$ ;月频次对应地震为 45 个,漏报 12 个,虚报 3 次。值得一提的是 2008 年 6 月和 7 月的月频次分别为 30 次和 22 次,2013 年 6 月的月频次为 36 次,均超过拟合线;而这 2 次虚报,分别出现在 2008 年 5 月汶川 8.0 级地震、2013 年 5 月鄂霍次克海 8.0 级地震之后;而 2015 年 5 月的月频次达 41 次,超过拟合线,由上述可认为,此次虚报可能与 2015 年 4 月尼泊尔 8.1 级地震有关,因此认为 2015 年 5 月开窗受到中国大陆周边大震影响(图 4,表 2)。

从图 2 可见,大同窗明显分为 3 个活跃时段和 2 个正常背景活动时段,且交替出现(表 3),另在 4 次  $M_L \geq 5.0$  地震活动时显示超出拟合线的异常高值。大同窗在活跃时段,山西带、张渤带地震密集发生;在正常背景活动时(平均约 4 年),山西带、张渤带发生的地震较

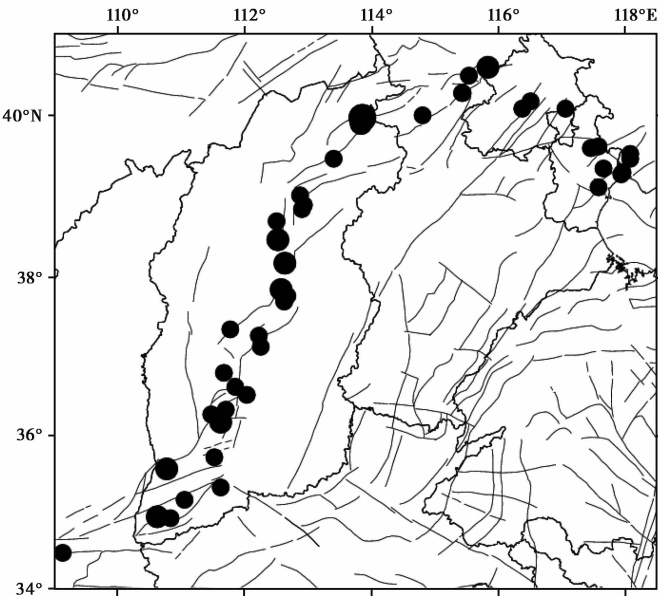


图 3 山西地震带及华北北部  $M_L \geq 4.0$  地震的震中分布

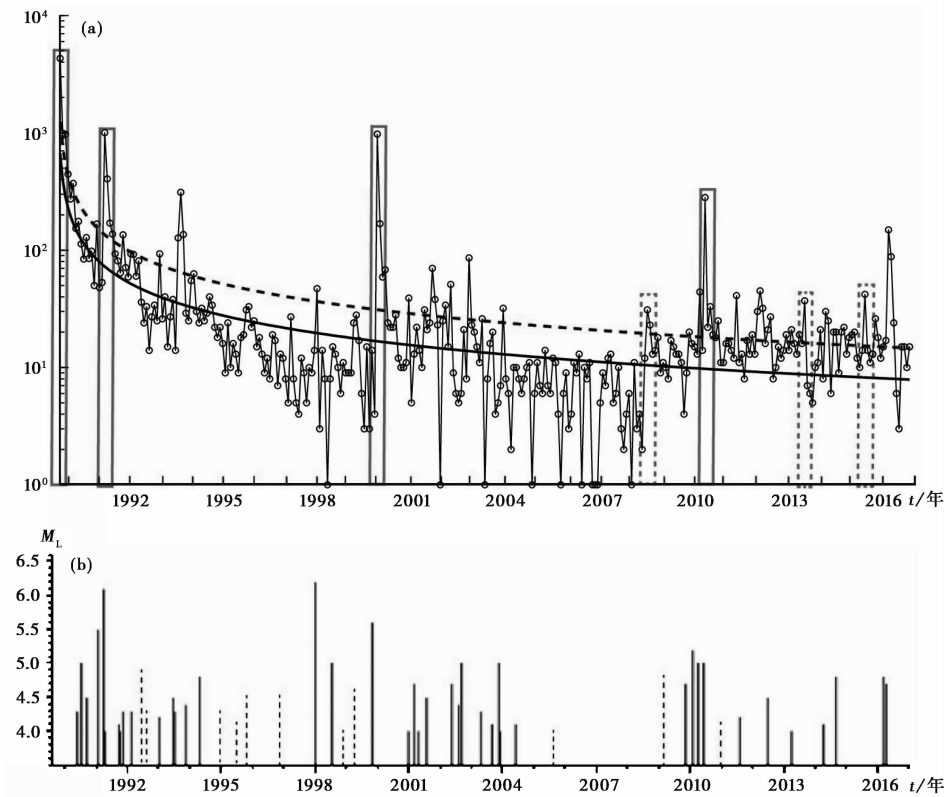


图 4 大同窗月频次统计结果及其与地震的对应情况

(a) 虚线所示为虚报事件, 实线所示为 4 次  $M_L \geq 5.0$  的事件; (b) 中实线为对应地震、虚线为漏报地震事件



表 2 周边大震与大同窗的地震频次

周边大震		大同窗月频次	
2008-05-12	汶川 8.0 级	2008-06	30
		2008-07	22
2013-05-24	鄂霍次克海 8.0 级	2013-06	36
2015-04-25	尼泊尔 8.1 级	2015-05	41

少。相比前 2 个活跃时段,第 3 个活跃时段自 2008 年 5 月汶川 8.0 级地震开始,持续时间最长,其间山西带、张渤带发生一系列中等地震,周边发生多个 8 级以上大震也造成了大同窗开窗的虚报现象,表明中国大陆周边强震对大同窗产生一定的影响(表 4)。

表 3 大同窗月频次衰减活动统计表

	时间段(年-月~年-月)	持续时间
活跃时段	1989-10~1994-01	4 年 3 个月
正常时段	1994-02~1997-11	3 年 9 个月
活跃时段	1997-12~2003-11	5 年 11 个月
正常时段	2003-12~2008-05	4 年 5 个月
活跃时段	2008-06 至今	8 年 4 个月

表 4 周边大震与大同窗的地震活动

周边大震		间隔时间/月	大同地震窗月频次		大同地震窗日频次	
2001-11-14	昆仑山 8.1 级	2	2002-01	33	2002-01-17	17
		4	2002-03	50	2002-03-28	23
2008-05-12	汶川 8.0 级	1	2008-06	30	未开窗	
		2	2008-07	22	未开窗	
2015-04-25	尼泊尔 8.1 级	1	2015-05	41	未开窗	
2003-09-26	日本北海道 8.0 级	2	2003-11	31	未开窗	
2006-11-15	千岛群岛 8.0 级		未开窗		未开窗	
2011-03-11	日本本州 9.0 级	1	2011-04	40	2011-04-16	20
					2011-04-17	10
2013-05-24	鄂霍次克海 8.0 级	1	2013-06	36	2013-06-03	11
2015-05-30	日本小笠原 8.0 级	4	2015-09	25	未开窗	

## 2.2 应变能结果

大同窗应变能时序曲线结果显示(图 5),幂函数衰减系数为 1.232,以虚线拟合的应变能异常  $\varepsilon=6.7373 \times 10^7 t^{-1.3298}$  为阈值,出现 19 次异常,有 3 次虚报;应变能变化对应地震为 26 个、漏报 31 个(图 5(b)、5(c)),地震对应率较频次指标差。其中,第 1 次(1997 年 2 月)和第 3 次(2015 年 5 月)虚报是受到青藏块体强震影响后,出现应变能超出阈值的异常(表 5);而第 2 次虚报出现在 2000 年 1~6 月,应变能为  $15347 \sim 31577 \sqrt{\text{J}}$ ,并无强震影响,可能是大同窗口 1999 年 11 月 1 日 5.6 级地震后自身能量调节所致。

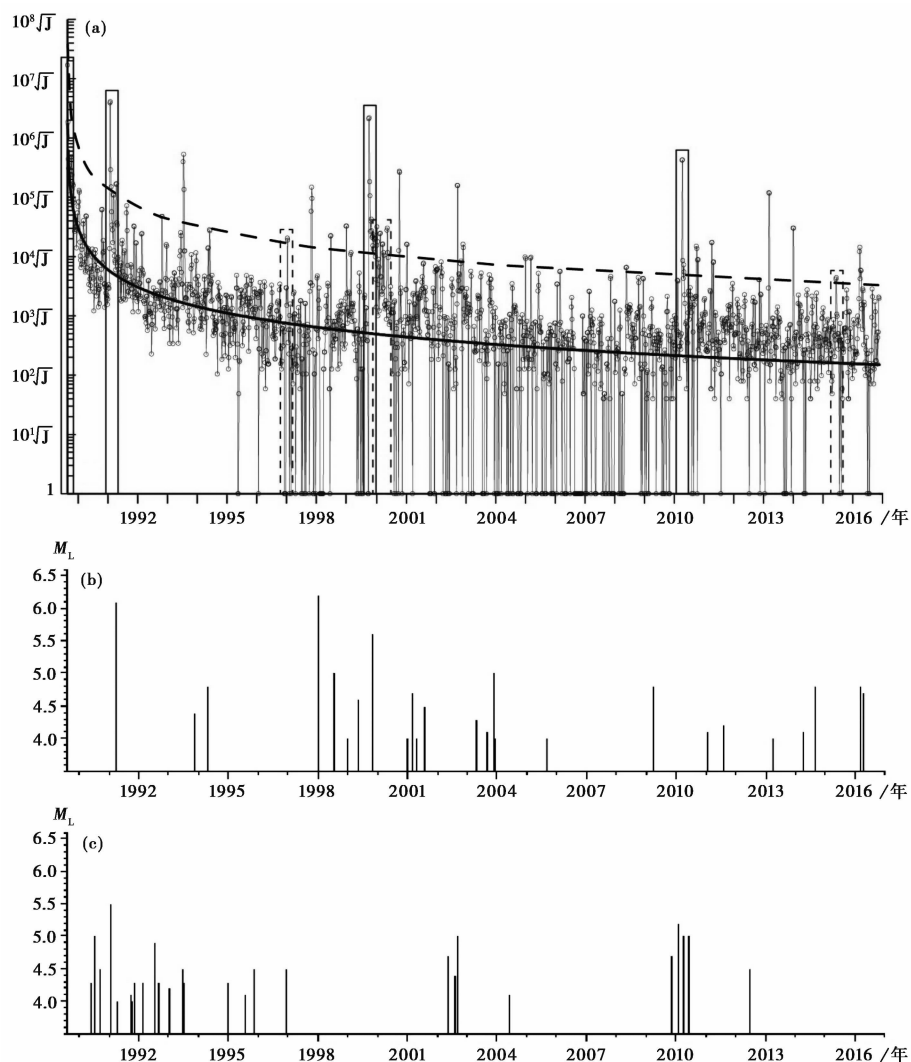


图5 大同窗应变能统计及其与地震对应情况

(a)虚线为虚报事件,实线为4次 $M_L \geq 5.0$ 事件;(b)对应地震;(c)漏报地震

由于发现大同窗的地震活动受周边强震的影响,因此本文统计了青藏块体1990年以来7级以上强震和西太平洋板块8级以上强震活动对大同窗开窗活动的影响,另对构造上直接相关的鄂尔多斯地块周缘 $M \geq 5.8$ 地震的影响也作了分析(图6)。自1990年以来青藏地区共发生7级以上地震10次,西太平洋板块8级以上地震5次,其中10次地震后1年之内,大同窗应变能指标出现超限异常(图5,表5);9组强震后,其中6组的应变能异常持续时间在5个月内、3组在半年以上。另5次未对大同窗产生影响的强震中,3次位于青藏块体,2次位于西太平洋板块,但其中汶川地震后1月内频次出现开窗异常,表明它还是对窗口活动产生一定的影响。

值得注意的是,西太平洋板块对大同窗产生影响的强震中(共5次),其中在3次强震后



表 5 青藏块体强震对大同窗应变能影响的统计结果

序号	青藏块体地震			青藏块体地震后异常 出现时间间隔/天	异常 出现时间 (年-月-日)	应变能/ $\sqrt{J}$
	发震时间 (年-月-日)	地点	震级			
1	1996-02-03	云南丽江	7.0	5	1997-02-08	20332.38
2	1996-11-19	昆仑山口	7.1	86	1997-02-13	18832.42
3	1997-11-08	西藏尼玛	7.5	17	1997-11-25	57584.78
				22	1997-11-30	147662.24
				27	1997-12-05	95465.50
4	2001-11-14	昆仑山口	8.1	395	2002-10-05	157633.1
					2002-10-10	156692.9
					2002-12-14	16072.98
5	2010-04-14	青海玉树	7.3	157	2010-09-18	14879.67
					2010-09-23	13637.37
6	2011-03-11	日本本州	9.0	11	2011-03-22	17126.96
				16	2011-03-27	17213.16
7	2013-04-20	四川芦山	7.0	230	2013-12-06	30090.24
	2013-05-24	鄂霍次克海	8.0	235	2013-12-11	30108.81
8	2015-04-25	尼泊尔	8.1	20	2015-05-10	4116.97
					2015-05-15	4384.18
9	2015-05-30	日本小笠原	8.0	270	2016-02-19	12103.59
					2016-02-24	14327.73

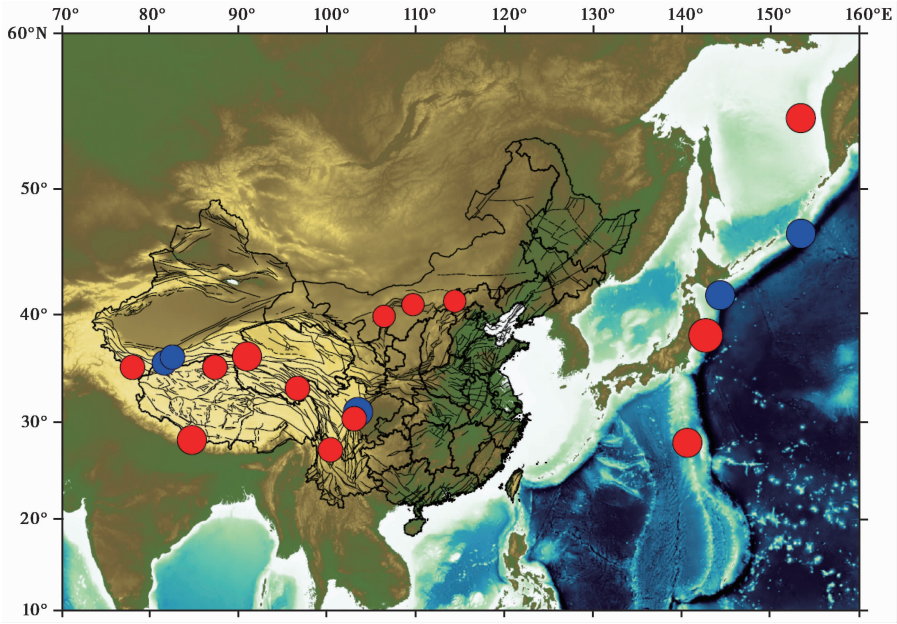


图 6 周边强震空间分布对大同窗应变能的影响  
红色代表有影响,蓝色代表无影响

应变能异常幅度较一般,其余 2 次未产生影响,说明该区域对大同窗的影响较青藏块体弱,且有研究认为 2011 年日本 9.0 级地震对华北地区的影响程度很弱,并不会改变区域现代构造应力场的分布格局(陈为涛等,2012;丰成君等,2013)。

另外,1990 年以来鄂尔多斯块体周缘  $M \geq 5.8$  地震共 3 次,均在地震后 1 年之内,大同窗应变能指标出现超限异常,且若震级越大、距离越近,则应变能异常出现越早、幅度越大,两者之间明显相关(表 6)。

表 6 鄂尔多斯块体周缘强震对大同窗应变能的影响

序号	鄂尔多斯块体周缘地震				地震后异常出现 时间间隔/天	异常出现时间 (年-月-日)	应变能 $\sqrt{J}$
	发震时间 (年-月-日)	地点	震级	与大同窗距离/km			
1	1996-05-03	包头	6.4	368	286	1997-02-08	20332.38
						1997-02-13	18832.42
2	1998-01-10	张北	6.2	132	194	1998-07-18	21957.5
						1998-07-23	22449.26
3	2015-04-15	阿拉善左旗	5.8	636	315	2015-05-10	4116.97
						2015-05-15	4384.18

### 3 讨论与结论

本文对大同窗地震的月频次进行幂函数衰减拟合,结果显示其衰减过程中存在活跃时段和正常活动时段的分段特征,第 3 次活跃时段始于 2008 年 5 月汶川 8.0 级地震后,持续时间较前 2 个活跃时段长,目前仍处在活跃时段。当大同窗地震处在活跃时段时,山西带和张渤带就密集发生一系列  $M_L \geq 4$  地震。大同窗地震的频次变化可能与构造应力场的强弱有关,当构造应力场随时间变化不大时,地震的频次变化较好地服从幂函数衰减,即处在正常背景活动时段;当地震频次变化超过幂函数衰减背景而出现异常峰值即活跃时段,可能反映了区域构造应力场的增强过程,山西带和张渤带  $M_L \geq 4$  地震发生在频次增高以后。大同窗地震活动在山西带远场地震、张渤带中等地震前有所反映,前者是由于大同窗位于同一大陆裂谷的北端,后者可能与大同火山至渤海下方“Y”字形低波速异常起到的传导作用有关(Lei,2012)。

本文以  $\varepsilon = 6.7373 \times 10^7 t^{-1.3298}$  为阈值结果,对大同窗的地震应变能进行统计分析,出现 19 次地震应变能超限异常,其中在 16 次异常出现后山西带和张渤带发生了中强地震,但其漏报地震较多,这较频次指标的映震效能差。大同窗位于山西带北端,而山西带又处于鄂尔多斯块体东缘,构造上存在较为直接的关联,因此鄂尔多斯块体周缘强震对大同窗地震活动产生直接影响,表现为强震的震级越大、与大同窗的距离越近,则大同窗应变能异常出现得越早、且幅度越大。另外,大同窗也受到青藏块体、西太平洋板块强震的间接影响,在两大块体的 11 次强震后地震频次或应变能有所反映。由于大同窗所处的构造环境复杂,位于六棱山北麓断裂、团堡断裂和大王村断裂交汇部位附近,区内还分布着玄武岩火山区,且窗口内发生过 1989、1991 和 1999 年大同-阳高中强震群,震区介质比较破碎敏感,对区域应力场的



变化反映灵敏。因此,受到印度板块 NE 向持续推挤作用,青藏高原整体隆升及其物质向东和东南出现“挤出”的侧向流动,其应力也会通过下地壳和上地面的粘滞层产生远程传递作用(Wang et al, 2001; 缪鹏, 2010; 李延兴等, 2005), 而强震活动正是地幔运动在地表的能量释放, 可通过应力传递对大同窗甚至山西带产生触发作用, 进而影响这些区域中强震的发生。值得关注的是, 2001 年昆仑山口 8.1 级、2008 年汶川 8.0 级和 2015 年尼泊尔 8.1 级地震后, 山西地震带约 2 年内出现了一系列中强地震; 而 2011 年日本 9.0 级地震后, 对山西地震带地震活动的影响很弱(陈为涛等, 2012; 丰成君等, 2013); 因此大同窗甚至山西带受青藏块体强震的影响较强, 而受西太平洋板块的俯冲作用的影响较弱, 这与一些学者对中国大陆周边板块作用的动力学研究结果较为一致(汪素云等, 1980)。

### 参考文献

- 敖雪明、王桂岭, 1998, 地震窗方法在新疆伽师强震群短、临预报中的应用, 内陆地震, **12**(4), 289~294。
- 陈为涛、甘卫军、肖根如等, 2012, 日本大地震对中国东北部地区地壳形变态势的影响, 地震地质, **34**(3), 425~439。
- 陈宇卫、张军、庆梅等, 2007, “霍山地震窗”小震序列运动学参数时变特征研究, 地震, **27**(1), 26~32。
- 啜永清, 1995, 大同-阳高地震的余震窗口, 山西地震, (1), 20~24。
- 啜永清, 1999, 大同-阳高地震的余震窗口特征及机理分析, 山西地震, (3~4), 25~30。
- 啜永清、刘巍、彭美煊, 1999, 大同-阳高地震的余震与华北北部较大地震的关系, 地震, (4), 379~386。
- 丰成君、张鹏、孙炜锋等, 2013, 日本  $M_w$  9.0 级地震对中国华北-东北大陆主要活动断裂带的影响及地震危险性初步探讨, 地学前缘, (6), 123~140。
- 洪德全、王行舟、程鑫等, 2013, 安徽霍山窗重复地震尾波  $Q_e$  值变化研究, 地球物理学报, **56**(10), 3416~3424。
- 姜秀娥、单锦芬、徐京华等, 1982, 华北强地震余震群应力场“窗口”效应, 西北地震学报, **4**(4), 41~46。
- 姜秀娥、张国民、单锦芬等, 1989, “地震窗”在地震预报中的应用, 见: 地震预报方法实用化文集-地震学专辑, 296~311, 北京: 学术书刊出版社。
- 李发、黄显良、陈宇卫等, 2013, 安徽“霍山窗”中小地震的地震波衰减特征研究, 地震学报, **35**(2), 209~217。
- 李延兴、张静华、郭良迁等, 2005, 鄂尔多斯逆时针旋转与动力学, 大地测量与地球动力学, **25**(3), 50~56。
- 吕芳、张淑亮、胡玉良等, 2013, 山西静乐井水位异常调查与分析, 山西地震, (3), 28~31。
- 缪鹏, 2010, 基于动力学背景的霍山震情窗综合分析研究, 硕士论文, 28~33, 合肥: 中国科学技术大学。
- 缪鹏、王行舟、洪德全等, 2014, “霍山震情窗”动力学背景及预测意义分析, 中国地震, **30**(4), 534~542。
- 苏鸾声, 1997, “博山震情窗口”预报效能的研究, 华北地震科学, **15**(3), 40~44。
- 王桂岭、敖雪明, 1987, 乌鲁木齐水磨沟“地震窗口”的异常特性及预报效能, 地震, (2), 15~23。
- 王培玲、胡玉, 2004, 湟源地震窗预报方法及效能的研究, 高原地震, **16**(4), 22~25。
- 汪素云、陈培善, 1980, 中国及邻区现代构造应力场的数值模拟, 地球物理学报, **23**(1), 35~45。
- 王想、王亚茹、郭蕾等, 2016, 2015 年 1 月 11 日河北滦县  $M_L$  3.3 震群震兆分析, 地震地磁观测与研究, **37**(2), 41~47。
- 王泽皋, 1979, 邢台余震频度增高及以后发生的华北强震, 地震学报, **1**(2), 150~153。
- 王泽皋, 1986, 关于震情窗口问题的实践和展望, 地震学报, **8**(3), 254~262。
- 王泽皋、孙国学、刁桂苓等, 1989, 震情窗口和震情地带的研究, 许绍燮编, 地震监测与预报方法清理成果汇编-测震学分册, 137~151, 北京: 地震出版社。
- 王泽皋、高景春、孙佩卿, 1995, 邢台震情窗口的遥联性, 山西地震, **1995**(2), 14~18。
- 夏瑞良, 1984, 安徽省佛子岭台平均震源机制解及其前兆意义, 华北地震科学, **1984**(2), 12~25。
- 薛丁、张建业、赵爱萍, 2012, 海城地震窗地震活动异常提取及其预报效能, 地震学报, **34**(4), 487~493。
- 郑兆蕊、庆梅、李敏莉, 1999, 霍山窗与华东中强地震关系研究, 地震学刊, **1999**(2), 1~9。
- Gutenberg B, Richter C F, 1956, Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration(second paper), Bull Seism Soc Am, **46**, 105~145。

Lei J, 2012, Upper-mantle tomography and dynamics beneath the North China Craton, *J Geophys Res*, **117**, B06313. doi: 10.1029/2012JB009212.

Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al, 2001, Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements, *Science*, **294**( 5542 ), 574 ~ 577.

## Characteristics of frequency and strain energy from seismic activity of the Datong window

*Wang Xia   Song Meiqin*

Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030021, China

**Abstract** In this paper, we analyze the frequency and strain energy of seismic activity of the Datong window from October 1989 to October 2016. The attenuation fitting result of monthly frequency from the Datong window show the characteristics of segmented alternating activity, including three active periods and two background periods. When the Datong window is in the active period, earthquakes occur intensely in the Shanxi seismic belt and Zhangjiakou-Bohai seismic belt; when it is in the normal background period, less earthquakes occur in the two seismic belt. The strain energy result indicates that strong earthquakes of the Ordos block' periphery has a direct impact on the Datong window; the more magnitude of strong earthquakes and the shorter distance from the window, the earlier the strain energy anomalies appear in the Datong window and the greater the amplitude. Additionally, strong earthquakes of the Qinghai-Tibetan block induce more effect on the Datong window, while that of western Pacific plate has a weak effect on the window. The Datong window after strong earthquakes of surrounding block may be related to the geological and tectonic environment, and therefore it is sensitive to the change of stress field.

**Key words:** Datong window; Monthly frequency; Strain energy