

熊峰, 张小艳, 王旭东, 等, 2021. 内蒙古中东部地区数字化形变同震响应特征研究. 中国地震, 37(1): 164~169.

# 内蒙古中东部地区 数字化形变同震响应特征研究

熊峰 张小艳 王旭东 杨红樱 苏亚梅

内蒙古自治区地震局, 呼和浩特 010010

**摘要** 以呼和浩特台、海拉尔台、乌兰浩特台、赤峰台等 4 个台站的数字化 DSQ 水管倾斜观测资料为基础, 应用统计方法, 研究了 2008—2018 年 200 个地震事件的远场同震响应特征。通过回归分析, 计算地震面波响应延迟时间、振幅、震级、震中距等基本物理量之间的函数关系。通过模型计算, 得到模拟震级与实际震级的  $R$  值多数为 0.8 左右, 标准误差在 0.3 左右。

**关键词:** 倾斜观测 数字化资料 同震响应 震级模拟分析

[文章编号] 1001-4683(2021)01-0164-06 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

在地震孕育过程中, 随着构造应力的不断积累, 地壳应变能也持续增加。利用同一地震事件在地球上相同地点引起的地面运动的唯一性, 定量研究同震形变波, 可以认识到在同一力源作用下同震波形特征的差异性。同震形变波中携带了地震破裂以及地震波传播的信息, 利用同震信息能够评估地震震源参数, 进一步分析同震形变波的物理特征, 有助于提高短临前兆动力特性的认识, 定量计算地壳应变能积累也是地震危险性分析的重要手段, 对于理解形变前兆观测的物理本质具有重要意义(牛安福等, 2002, 2003, 2006; 庞亚瑾等, 2017)。

地壳形变观测是监测地壳运动、变形的重要手段, 同震形变波包含了地震破裂及传播过程的大部分信息, 研究同震信息可以对地震震源的一些参数进行估计, 通过研究同震形变波的物理性质, 有助于认识短临前兆的动力特性(牛安福等, 2002、2003、2006)。

定点倾斜、应变、重力和连续 GPS 观测, 可检测到丰富的地壳变动信息。对于如何识别与地震过程相关的变形信息, 前人虽已做了大量的研究, 但尚未形成较为统一的标准(黄晓华等, 2009; 杨婕等, 2010; 肖孟仁等, 2012; 孟方杰等, 2018)。依据地震类型和震级的不同, 分别计算和分析所对应的同震响应, 进一步确定由于破坏性地震引起的形变同震响应以及震后影响的空间特征(司学芸等, 2012)。本文利用同一构造带上多个台站相同型号数字化倾斜仪资料, 通过回归分析, 计算不同场地的远场形变同震响应特征及有关物理量之间的函数关系, 获取不同观测场地同震响应能力的差异。

[收稿日期] 2019-12-31 [修订日期] 2020-11-09

[项目类别] 内蒙古自治区地震局局长基金重点项目(2020JP03)资助

[作者简介] 熊峰, 女, 1971 年生, 高级工程师, 主要从事内蒙古地球物理台网数据质量监控和形变监测工作。

E-mail: 13604715743@126.com

## 1 资料基本情况

呼和浩特台、赤峰台、乌兰浩特台、海拉尔台等 4 个台站的水管倾斜观测均为数字化观测,其观测资料连续稳定可靠,观测精度均超过 0.01,台站分布见图 1。本文以中国地震信息网发布的地震参数为依据,应用统计方法,对 2008—2018 年的 200 个地震(国内 6 级以上、国外 7 级以上)的同震响应特征进行了分析研究。

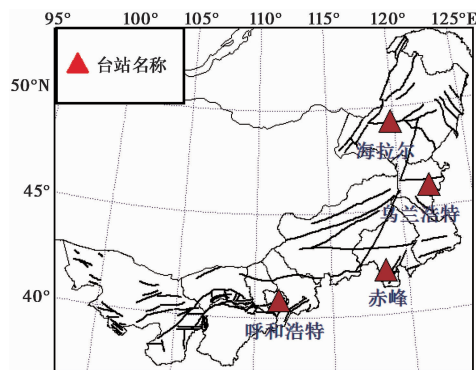


图 1 台站分布

### 1.1 地震地质背景

内蒙古位于中国北部边疆,横跨我国西北、华北、东北地区,地质构造较为复杂,活动断层分布纵横交错,地形地貌特征存在着较大的差异。有仪器记录以来,内蒙古区域内曾发生多次中强及以上地震,主要分布在两大地震活动区域。其中,中、西部地震区主要受燕山、阴山构造带和鄂尔多斯块体周缘的影响,是内蒙古境内主要的中强地震活动地区。东部地震区主要受到太平洋板块俯冲的影响。该板块的俯冲作用不仅是深源地震的动力来源,也是东北地区地质构造运动的主要因素(杨彦明等,2017)。

研究区域整体地质构造背景为阴山构造带和大兴安岭造山带,呼和浩特紧临大青山山前断裂,海拉尔、乌兰浩特、赤峰分别位于大兴安岭造山带北、中、南段。其中,呼和浩特地处呼包断陷盆地,北靠大青山,具有发生中强地震的构造条件,1929 年毕克齐  $M6.0$  地震距呼和浩特 24km,1976 年和林格尔  $M6.3$  地震距呼和浩特 80km;赤峰为蒙古高原向松辽平原过渡地带,燕山北麓和大兴安岭余脉绵延于赤峰西拉沐沦河、老哈河流域,主要断裂构造有:天山口-八里罕新华夏系断裂构造带、西拉沐沦 EW 向断裂构造带、锦山-开原 EW 向断裂构造带;乌兰浩特主要断裂构造有:霍林河 EW 向断裂构造带、宝石 EW 向断裂构造带、归流河 EW 向断裂构造带、阿尔山-阿尔本格勒 EW 向断裂构造带和伊尔施北部 EW 向断裂构造带;海拉尔位于大兴安岭隆起带与海拉尔沉降盆地接触地带,构造以 NE 向为主,大断裂带有嫩江大断裂,大兴安岭西侧有德尔布干大断裂,NE 向有巴尔图断裂、额尔古纳断裂,NW 向主要有嫩江大断裂的次断裂。

### 1.2 观测资料概况

中国地震局“十五”数字化项目完成之后,内蒙古地球物理台网积累了丰富、完整的数字化原始观测资料。表 1 为数字化水管倾斜观测仪器概况。

表 1 数字化倾斜观测仪器概况

台站名称	仪器名称	仪器型号	采样率 /min	仪器墩 岩性	仪器基本参数	
					基线长度/m	格值/(10 <sup>-3</sup> "·mV <sup>-1</sup> )
呼和浩特基准地震台	水管倾斜仪	DSQ	1	片麻岩	NS21.46	0.46395
					EW22.58	0.44652
赤峰中心地震台	水管倾斜仪	DSQ	1	花岗岩	NS 13.75	0.58141
					EW13.75	0.60876
乌兰浩特地震台	水管倾斜仪	DSQ	1	花岗岩	NS14.08	0.67269
					EW14.0	0.63492
海拉尔地震台	水管倾斜仪	DSQ	1	花岗岩	NS12.22	0.57413
					EW15.3	0.51778

## 2 同震形变研究

### 2.1 同震形变

受地震波激发,借助数字化形变前兆仪器观测到的地震时倾斜、应变或应力的波动现象称为震时形变波,以区别于地震波。震时形变波是地震波的另一形式(牛安福等,2005)。地震波通过地震仪输出的往往是位移、速度和加速度等,而震时形变波则主要是倾斜、应变或应力的瞬间波动,其震时输出信号持续时间依赖于震中距和仪器精度,主要集中在几十分钟到几小时范围内。由于采样的局限性,震时形变波目前仍较难展示 P 波和 S 波初动,因而震时形变波反映的主要是远场面波。

面波主要包括勒夫波和瑞雷波。前者仅在水平方向运动,后者在行进面内运动。面波是地震体波反射产生的派生波,能量强、传播远。利用同震倾斜形变阶跃可给出地震的震源机制。

### 2.2 面波延迟时间与震中距的关系

面波延迟时间,指在测点观测到的响应与地震发生时刻之间的等待时间。该等待时间与地震面波的传播速度及震中距有关。数字化水管倾斜仪采样率为分钟,面波到达时间受采样率约束,精确到分钟。表 2 为震中距与面波延迟时间的函数关系和 R 值。

表 2 震中距与面波延迟时间的函数关系和 R 值

台站名称	震中距 /km	延迟时间 /min	函数关系 (x:震中距,y:面波延迟时间)	R 值	
呼和浩特基准地震台	1000~20000	1~50	$y_{NS} = 0.0017x + 1.911$	$R_{NS} = 0.85$	$R_{EW} = 0.84$
			$y_{EW} = 0.0019x + 2.1229$		
赤峰地震台	800~20000	1~60	$y_{NS} = 0.0015x + 6.952$	$R_{NS} = 0.75$	$R_{EW} = 0.74$
			$y_{EW} = 0.0017x + 6.6999$		
乌兰浩特地震台	600~19000	1~45	$y_{NS} = 0.0015x + 3.3934$	$R_{NS} = 0.87$	$R_{EW} = 0.90$
			$y_{EW} = 0.0017x + 3.0163$		
海拉尔地震台	800~20000	1~50	$y_{NS} = 0.0015x + 3.5729$	$R_{NS} = 0.83$	$R_{EW} = 0.84$
			$y_{EW} = 0.0016x + 3.9999$		

x 值的系数为 0.0015~0.0019,该系数反映了面波的速率,系数越小,面波速率越高。由于距离跨度较大,所反映的速率比真实的面波速率要高。

本研究选取 2008—2018 年记录到的中国境内 50 个  $6.0 \leq M < 8.0$  地震及增加的全球 150 个  $M \geq 7.0$  地震,共 200 个样本作为研究对象,面波延迟时间与震中距进行回归计算后呈线性分布特征, $R$  值在 0.74~0.90,相关特征显著。最大  $R$  值台站为乌兰浩特台,最小  $R$  值台站为赤峰台;乌兰浩特台面波延迟时间与震中距正相关特征明显,震中距越远,面波延迟时间越长,面波到达等待时间长,说明面波到达传播速度慢,存在低速现象。图 2 为水管倾斜仪面波延迟时间与震中距关系特征。

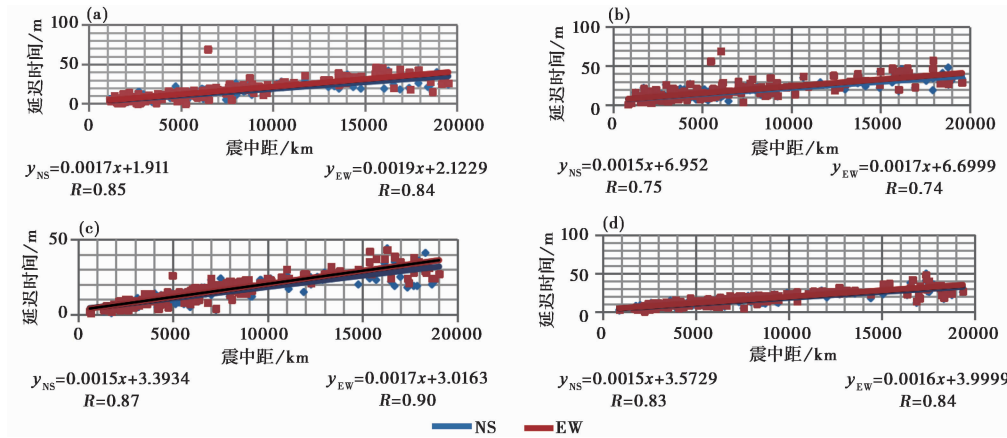


图 2 面波延迟时间与震中距关系特征

(a)呼和浩特台;(b)赤峰台;(c)乌兰浩特台;(d)海拉尔台

### 2.3 同震形变振幅与震中距、震级关系研究

由数据分析结果可以看出,同震形变震级与振幅等具有线性相关,但是受震中距影响明显,且非简单相关。为检验同震形变观测中场地响应能力的大小和差异,应用回归分析,拟合震级模型公式

$$M = a \lg A + b \lg D / D_0 + C \tag{1}$$

式中, $M$  为震级, $A$  为振幅, $D$  为震中距, $D_0 = 290\text{km}$  为地应力波半波长(牛安福,2017)。通过将 200 个震例的同震形变物理量作为基本参数与震级模型进行拟合,求出各台站水管倾斜两分量系数及参数,得出同震形变震级公式。具体参数见表 3。

表 3 同震形变震级公式及误差

台站名称	测项分量	同震形变震级公式	$R$ 值	标准误差
呼和浩特基准地震台	NS	$M = 0.621 \lg A + 0.771 \lg D / D_0 + 5.36$	0.84	0.32
	EW	$M = 0.651 \lg A + 0.761 \lg D / D_0 + 5.32$	0.87	0.29
赤峰地震台	NS	$M = 0.951 \lg A + 0.331 \lg D / D_0 + 5.11$	0.57	0.48
	EW	$M = 0.651 \lg A + 0.891 \lg D / D_0 + 4.96$	0.84	0.31
乌兰浩特地震台	NS	$M = 1 \lg A + 0.281 \lg D / D_0 + 5.08$	0.54	0.49
	EW	$M = 0.661 \lg A + 0.741 \lg D / D_0 + 5.15$	0.85	0.31
海拉尔地震台	NS	$M = 0.671 \lg A + 0.811 \lg D / D_0 + 5.02$	0.83	0.32
	EW	$M = 0.551 \lg A + 0.821 \lg D / D_0 + 5.20$	0.80	0.35

通过计算理论震级与实际震级的  $R$  值及标准误差,可以得出多数测项对  $\lg A$  的相关系数在 0.65 左右,对  $\lg D$  的相关系数在 0.8 左右,震级拟合误差在 0.3 级左右,拟合  $R$  值总体在 0.8 左右。在以上回归分析中,赤峰台 NS 向和乌兰浩特台 NS 向  $R$  值偏低,在 0.55 左右。赤峰台 NS 向和乌兰浩特台 NS 向的观测对振幅的依赖较强,其相关系数分别为 0.95 和 1.0;但对距离的依赖较弱,其相关系数分别为 0.33 和 0.28,很可能是由于该观测测项的阻尼较低,影响了观测的稳定性。

### 3 结论

通过研究 2008—2018 年 200 个地震的同震形变波形,回归分析地震面波响应延迟时间、振幅、面波持续时间、震级、震中距等基本物理量之间的函数关系,对 4 个台站的场地响应能力进行了初步判定,结论如下:

(1) 面波延迟时间与震中距具有显著相关性, $R$  值在 0.74~0.90,最大  $R$  值台站为乌兰浩特台,最小  $R$  值台站为赤峰台;乌兰浩特台面波延迟时间与震中距正相关特征明显,震中距越远,面波延迟时间越长,面波到达等待时间越长。

(2) 同震振幅与地震震级、震中距有一定的相关性。通过震级拟合模型分析得出,拟合震级与实际震级相关系数多数为 0.8 左右,震级误差为 0.3 级左右。在震级回归模型分析中,赤峰台 NS 向和乌兰浩特台 NS 向  $R$  值偏低,赤峰台和乌兰浩特台 NS 向的观测对振幅的依赖较强,其相关系数分别为 0.95 和 1.0;但对距离的依赖较弱,其相关系数分别为 0.33 和 0.28,很可能是由于地震波频段仪器的阻尼较低造成的。

致谢:感谢审稿专家为本文提出的宝贵意见。

### 参考文献

- 黄晓华,杨佩琴,陈智勇,等,2009. 厦门台地震前兆异常分析. 大地测量与地球动力学,29(5):38~42.
- 孟方杰,张燕,2018. 利用不同倾斜仪和应变仪检测地球自由振荡的对比与分析. 中国地震,34(1):133~140.
- 牛安福,2003. 地倾斜变化的突变性及与地震关系的研究. 地震学报,25(4):441~445.
- 牛安福,2017. 地应力波与地震预测基础. 北京:地震出版社.
- 牛安福,张晶,高旺福,等,2002. 地壳持续加速变形与地震关系的研究. 大地测量与地球动力学,22(1):29~33.
- 牛安福,张晶,高旺福,等,2006. 印尼强地震引起的同震形变波. 地震,26(1):131~137.
- 牛安福,张晶,吉平,2005. 强地震引起的同震形变响应. 内陆地震,19(1):1~7.
- 庞亚瑾,程惠红,张怀,等,2017. 巴颜喀拉块体东缘形变及九寨沟地震孕震环境数值分析. 地球物理学报,60(10):4046~4055.
- 肖孟仁,梁帅,操红,2012. 南昌地震台钻孔应变同震响应分析. 大地测量与地球动力学,32(增刊 I):72~75,80.
- 杨婕,占惠,卓群,等,2010. 厦门地震台重力仪同震响应特征分析. 大地测量与地球动力学,30(增刊 I):96~99.
- 杨彦明,姜立新,王祯祥,2017. 基于 Levenberg-Marquardt 方法的内蒙古及邻区地震烈度影响场改进技术. 地震,37(3):117~126.
- 司学芸,邵志刚,周龙泉,等,2012. 汶川 8.0 级地震近场流体的同震响应与震后效应机理的数值模拟研究. 地震,32(1):49~58.

## Study on Co-seismic Response Characteristics of Digital Deformation in Central-Eastern Inner Mongolia

Xiong Feng Zhang Xiaoyan Wang Xudong Yang Hongying Su Yamei

Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China

**Abstract** On the basis of the Digital Dsq water pipe tilt data from the Daqingshan piedmont fault at Hohhot, Hailar, Ulan Hot and Chifeng stations in the north, middle and south sections of Great Khingan, we applied the statistical method to study the far-field coseismic responses of 200 earthquake events from 2008 to 2018. The delay time and amplitude of seismic surface wave response, and the functional relationship between them and basic physical parameters such as magnitude and epicentral distance are calculated by regression. Through the model calculation, the  $R$  value of the simulated magnitude and the actual magnitude is about 0.8 mostly, and the standard error is about 0.3.

**Keywords:** Tilt observation; Digital data; Coseismic response; Magnitude simulation analysis