

郭蕾,孟令媛. 2024. 河北及邻区地震活动固体潮调制统计分析. 中国地震, 40(2): 399~409.

河北及邻区地震活动固体潮调制统计分析

郭蕾^{1,2)} 孟令媛³⁾

1) 河北省地震局, 石家庄 050021

2) 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站, 河北邢台 055350

3) 中国地震台网中心, 北京 100045

摘要 采用 Schuster 检验方法, 以潮汐体应力为计算量, 对河北及邻区中小地震活动受固体潮触发情况进行日尺度及月尺度检验。研究结果显示, 不同区域呈现不同的固体潮调制特征, 晋冀蒙交界区域的地震活动受半月潮调制作用较为显著, 冀鲁豫地区的地震活动受半日潮作用较为显著, 而京津唐地区的地震活动与固体潮汐之间的相关性较小。不同区域、不同时段地震受潮汐触发的震级有所不同, 同一区域不同时段、不同震级的地震活动呈现不同的固体潮调制特征。

关键词: 河北及邻区 固体潮触发 Schuster 检验

[文章编号] 1001-4683(2024)02-0399-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

日、月起潮力引起的固体潮在地球内部产生具有周期性变化特征的应力, 即潮汐应力, 其量级为 10^3 Pa 左右, 显然小于地震应力降, 但是其加载速率却比构造应力积累的速度大 2 个数量级 (Heaton, 1975, 1982), 且潮汐应力对地球的另一位置具有重复作用的特点, 潮汐的这种振荡特性在潮汐应力触发中可能起到更为重要的作用 (Lockner et al, 1999)。因此, 潮汐应力可能对地震的发生具有触发作用, 特别是处于临界应力状态的断层 (Aki, 1956), 基于此, 国内外众多学者对潮汐应力与地震的触发关系开展了相关研究。

针对地震受潮汐应力触发的研究主要集中在三个方面: ①地震发震时刻与月相的关系, 该方法主要研究某一区域地震与月相的对应关系。众多研究结果显示, 地震在某些月相附近发生几率相对较高 (杜品仁等, 1999; 李志安等, 1994; 陈学忠等, 1998; 黎凯武, 2000; 张国民等, 2001; 蒋海昆等, 2008; 韩颜颜等, 2017)。②潮汐应力对地震的调制触发作用, 该方法从潮汐应力的角度研究震源处的潮汐应力对发震断层的触发效应。该方面研究存在较大的争议, 部分研究结果显示潮汐应力与地震存在相关性 (Klein, 1976; 王威中等, 1989; 吴小平等, 1999, 2005; Tanaka et al, 2014; 张晶等, 2007; 李金等, 2016; 马青波等, 2018; 李艳

[收稿日期] 2023-04-11 [修定日期] 2023-10-20

[项目类别] 地震预测开放基金 (HX22029D)、河北省地震科技星火计划项目 (DZ2021121500009) 共同资助

[作者简介] 郭蕾, 女, 1989 年生, 高级工程师, 主要从事地震活动性及数字地震学研究。E-mail: guolei@hbdzj.gov.cn

孟令媛, 通讯作者, 女, 1983 年生, 研究员, 主要从事震源物理及地震活动性研究。

E-mail: menglingyuan@seic.ac.cn

娥等,2018;李梦圆等,2021),但是不同学者利用不同方法得出的结论并不统一,部分研究结果则认为潮汐应力与地震不存在显著的相关性(Tsuruoka et al,1995;Vidale et al,1998;Lockner et al,1999;Tanaka et al,2006;陈学忠等,2009)。

③发震时刻固体潮周期、相位的统计学分析,由于潮汐相位角的分布情况可以直观地反映出地震活动是否集中于潮汐曲线的某些相位,从而有助于认识地震活动是否受到潮汐调制或触发,当地震数量足够多时,通常从统计的角度研究地震活动的潮汐触发,即基于大量地震样本,通过严格的统计检验地震活动受潮汐调制的显著程度(Tanaka et al,2002;李金等,2011a,2011b;李金等,2014;张涵等,2019;杨春艳等,2023)。目前,应用较多的方法为Schuster检验,该方法通过 p 值(即拒绝零假设的显著性水平)的变化来反映潮汐与地震发生之间的关系(Schuster,1897)。本文研究区域包含邢台、唐山、张北老震区,小震活动丰富,有大量地震样本,因此采用Schuster检验方法,对河北及邻区中小地震活动受固体潮触发情况进行日尺度及月尺度检验,探讨固体潮对河北及邻区地震活动的调制特征。

1 数据与方法

1.1 数据选取

基于河北地区复杂的构造背景,结合地震活动空间特征及不同区域监测能力的差异,将河北及邻区分为京津唐、晋冀蒙以及冀鲁豫三个区域分别进行分析研究(图1)。

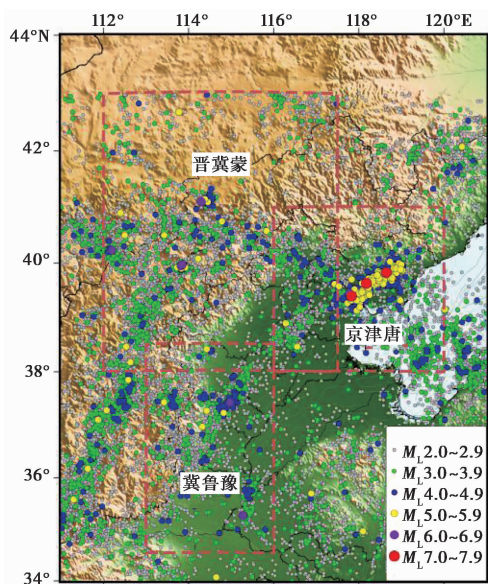


图1 研究区域及 $M_L \geq 2.0$ 地震分布情况

为保证潮汐相关性统计结果的准确性,首先采用震级-序号法和多统计方法(蒋长胜等,2013)对最小完备性震级 M_c 进行评估,其中,多统计方法是结合最大曲率法(MAXC)和拟合优度法(GFT-90%、GFT-95%)的一种综合评估方法。评估结果显示,1970年以来京津唐地区的 M_c 为 $M_L 2.0$ 左右,直至1976年受唐山7.8级地震余震序列的影响,1976—1978年期

间 M_c 仅能达到 $M_L 4.0$, 1978—1987 年期间 M_c 浮动较大, 在 $M_L 1.0 \sim 3.0$ 之间, 之后至 2009 年间, M_c 为 $M_L 2.0$, 经过数字化改造, 2015 年后 M_c 达到 $M_L 1.0$ (图 2); 1970 年以来晋冀蒙地区的 M_c 为 $M_L 2.0$ 左右, 2008 年首都圈地区地震观测网络经过数字化改造, 地震监测能力不断提升, 2009 年后 M_c 达到 $M_L 1.0$ 左右 (图 3); 1970 年以来冀鲁豫地区 M_c 为 $M_L 2.5$, 2015 年后 M_c 可达到 $M_L 1.0$ 左右 (图 4)。

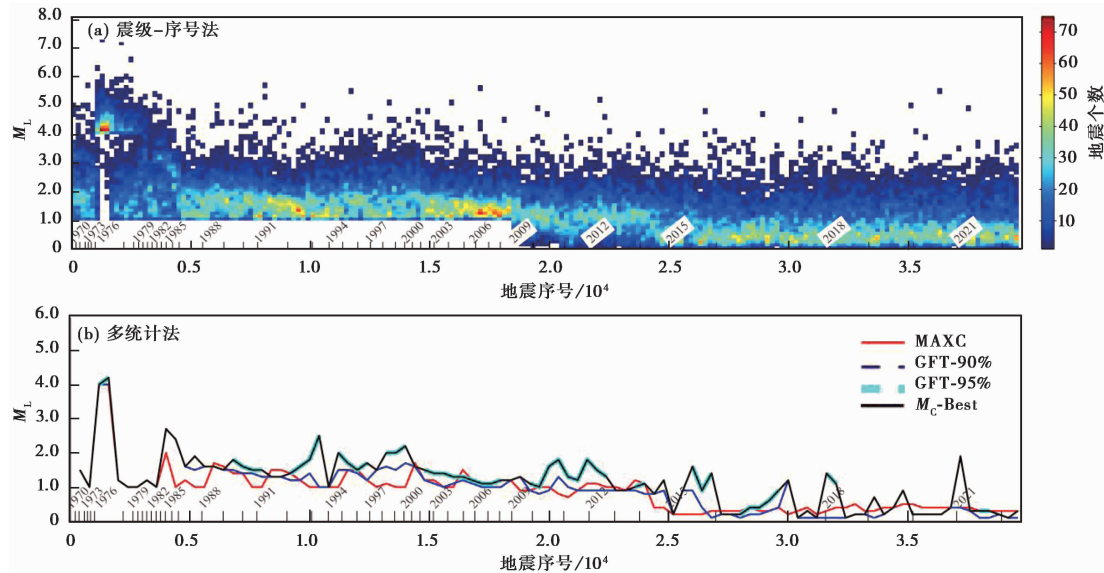


图 2 京津唐地区 1970 年以来地震目录最小完备性震级分析

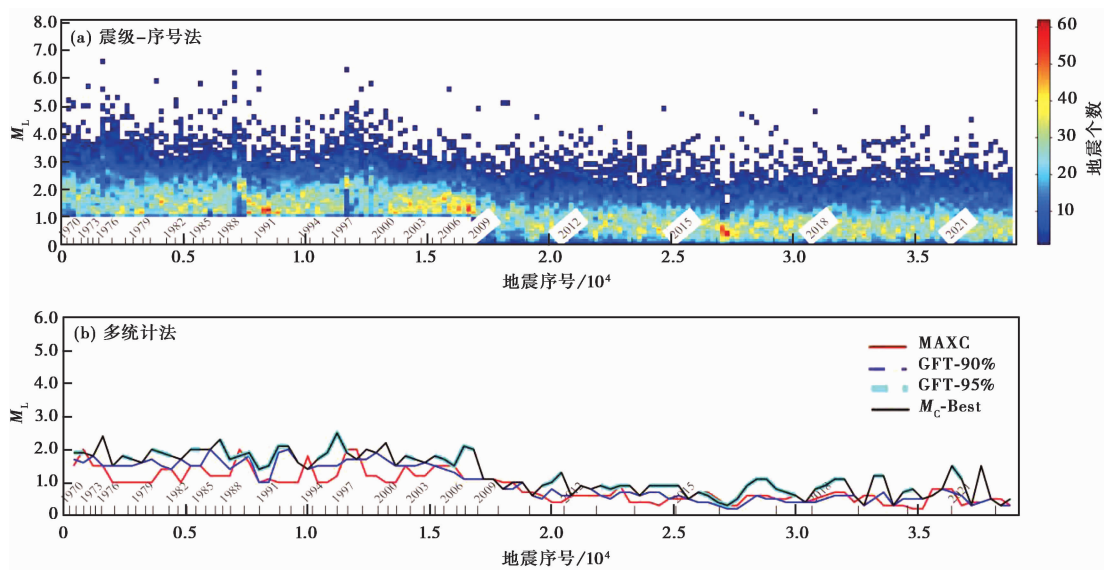


图 3 晋冀蒙地区 1970 年以来地震目录最小完备性震级分析

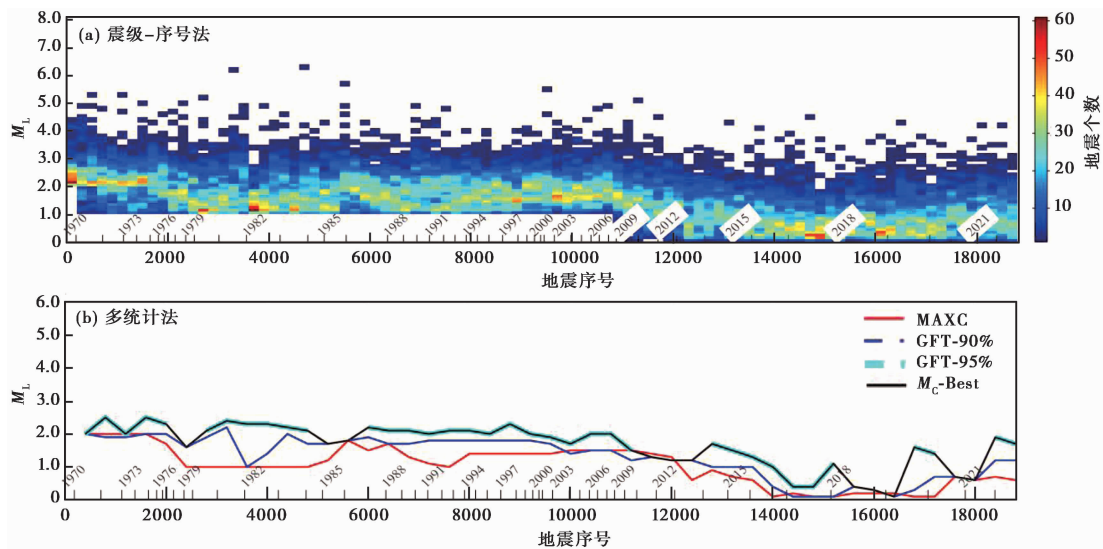


图4 冀鲁豫地区1970年以来地震目录最小完备性震级分析

由于京津唐地区的 M_c 在1987年之前不稳定,因此采用1987年之后的地震数据对该研究区进行分析,其他两个研究区域则采用1970年之后的地震数据进行分析。Tanaka等(2006)研究表明,丛集性地震对潮汐相位角的分布情况严重偏离实际,采用伪随机时空窗法去除了研究区的丛集性地震及较大地震的余震序列。发现河北及邻近地区的地震目录中5537个地震丛集共27809个地震事件,主要为较大地震后短时间内在主震附近发生的地震丛,删除地震丛集后的地震目录共有103847个地震;然后根据最小完备性震级的时间变化对各研究区域进行分段,最终确定本研究采用的地震数据(表1)。

表1 研究区域不同时段 M_c 及选用数据

研究区域	全时段		2009—2014年		2015—2022年	
	M_c	地震个数	M_c	地震个数	M_c	地震个数
京津唐(1987—2022年)	$M_L 2.0$	4218	$M_L 1.5$	1414	$M_L 1.0$	3781
晋冀蒙(1970—2022年)	$M_L 2.0$	6227	$M_L 1.0$	3258	$M_L 1.0$	3670
冀鲁豫(1970—2022年)	$M_L 2.5$	1813	$M_L 2.0$	291	$M_L 1.0$	1775

1.2 分析方法

Schuster 检验(Tanaka et al,2002、2006)建立了潮汐现象随时间变化的函数,该统计方法通过计算所有地震对应的相位角,统计相位角分布情况,分析是否存在优势相位角,进而判断地震活动是否受潮汐触发。利用 Schuster 检验方法分析固体潮与地震活动之间的关系,首先计算震源地的潮汐力,地震发震时刻的相位角依据潮汐力变化进程进行赋值(图5),将时间最接近的波峰和波谷之间的角距离进行线性划分,指定波峰相位角为 0° ,之前和之后的波谷为 $\pm 180^\circ$,这样便可确定每个地震的潮汐相位角(Tanaka et al,2014)。确定所有地震的潮汐相位角之后,可通过 Schuster 检验分析其是否在某一特定角度集中,即是否受到固体潮汐的触发。

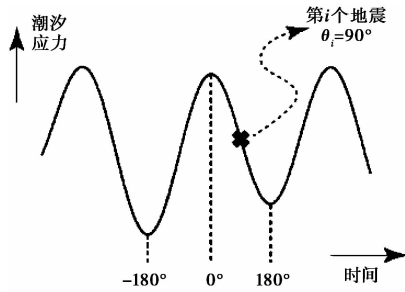


图 5 潮汐相位角的确定 (Tanaka et al, 2014)

在 Schuster 检验中,每个地震被表达为一个单位长度的向量,其方向由前述潮汐相位角确定,这些向量之和由 L 描述, L 的相位角即为所有地震数据的优势相位角。 L 的几何意义如图 6 所示, L 值由下式确定

$$L = \sqrt{A^2 + B^2} \tag{1}$$

$$A = \sum_{i=1}^N \cos\theta_i, B = \sum_{i=1}^N \sin\theta_i \tag{2}$$

其中, θ_i 表示第 i 个地震的潮汐相位角, N 表示地震总数。如果地震在时间上是随机发生的,则潮汐相位角应随机分布,此时和向量的长度大于或等于 L 的概率为 (Tsuruoka et al, 1995)

$$p = \exp\left(-\frac{L^2}{N}\right) \tag{3}$$

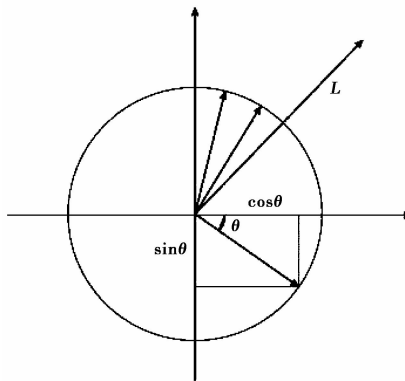


图 6 L 的几何意义

若定义“零假设”为地震随机发生,与潮汐相位角无关,则此处的 p 值为拒绝零假设的显著性水平, p 值的取值范围为 $0 \sim 1$, p 值越小,拒绝零假设的可能性越大。研究表明,一般将 $p < 0.05$ 作为判断潮汐能够触发地震的阈值 (Heaton, 1975)。

2 结果分析

本研究选择潮汐体应力对研究区范围内大于最小完备性震级的地震受固体潮触发情况

进行检验。潮汐体应力不随坐标的旋转而变化,即不依赖断层面,可以反映震源区整体的受力状态(李金等,2014)。对于潮汐体应力, 0° 和 $\pm 180^\circ$ 分别代表最大潮汐张应力和最小潮汐张应力(Tanaka et al,2002)。在进行日尺度潮汐相位角统计检验的基础上,进一步分析研究区地震活动与半月潮的关系,取每日12时的潮汐应力值作半月潮曲线,其中 0° 表示大潮(即农历朔、望), $\pm 180^\circ$ 表示小潮(即农历上、下弦)。基于Schuster检验方法,分别对京津唐、晋冀蒙和冀鲁豫地区地震活动受固体潮触发情况进行日尺度和月尺度检验。

2.1 京津唐地区

对京津唐地区不同时段、不同震级下限的地震活动进行Schuster检验(表2),从全时段来看,以最小完备性震级 $M_L 2.0$ 为震级下限,日尺度潮汐体应力 p 值计算结果为0.396,月尺度潮汐体应力 p 值计算结果为0.318,均大于触发阈值0.05。不同时段计算结果中仅2015—2022年 $M_L 3.0$ 以上地震月尺度引潮力的 p 值计算结果为0.048,接近触发阈值0.05。不同震级档的地震活动 p 值计算结果也均大于触发阈值0.05(表3)。总体来看,京津唐地区的地震活动受固体潮调制作用并不显著。

表2 京津唐地区不同震级下限潮汐体应力Schuster检验统计结果

周期波	全时段(1987—2022年)			时段I(1987—2008年)			时段II(2009—2014年)			时段III(2015—2022年)		
	M_c	地震个数	p 值	M_c	地震个数	p 值	M_c	地震个数	p 值	M_c	地震个数	p 值
半日潮	$M_L 2.0$	4218	0.396	$M_L 2.0$	2948	0.681	$M_L 1.5$	1414	0.549	$M_L 1.0$	3781	0.441
	$M_L 2.5$	1490	0.369	$M_L 2.5$	1061	0.763	$M_L 2.0$	534	0.858	$M_L 1.5$	1805	0.053
	$M_L 3.0$	484	0.246	$M_L 3.0$	344	0.326	$M_L 2.5$	178	0.524	$M_L 2.0$	736	0.490
半月潮	$M_L 2.0$	4218	0.318	$M_L 2.0$	2948	0.082	$M_L 1.5$	1414	0.346	$M_L 1.0$	3781	0.073
	$M_L 2.5$	1490	0.648	$M_L 2.5$	1061	0.453	$M_L 2.0$	534	0.620	$M_L 1.5$	1805	0.246
	$M_L 3.0$	484	0.701	$M_L 3.0$	344	0.198	$M_L 2.5$	178	0.313	$M_L 2.0$	736	0.048

表3 京津唐地区不同震级档潮汐体应力Schuster检验统计结果

震级档	地震个数	p 值	
		半日潮	半月潮
$M_L 3.0 \sim 3.9$	412	0.312	0.271
$M_L 4.0 \sim 4.9$	65	0.573	0.145
$M_L 5.0 \sim 5.9$	7	0.659	0.867

2.2 晋冀蒙地区

对晋冀蒙地区不同时段、不同震级下限的地震活动进行Schuster检验(表4),以最小完备性震级 $M_L 2.0$ 为震级下限,1970—2022年的日尺度潮汐体应力 p 值计算结果为0.913,月尺度潮汐体应力 p 值计算结果为0.677,均大于触发阈值0.05;而以 $M_L 3.0$ 为震级下限的月尺度潮汐体应力的 p 值计算结果为0.0002,远远小于触发阈值0.05。不同时段计算结果中也有多个月尺度潮汐体应力的 p 值计算结果小于触发阈值0.05。由此可见,晋冀蒙地区的地震活动受半月潮调制作用较为显著。不同震级档的地震活动 p 值计算结果(表5)显示出

表 4 晋冀蒙地区不同震级下限潮汐体应力 Schuster 检验统计结果

周期波	全时段(1970—2022年)			时段 I (1970—2008年)			时段 II (2009—2022年)		
	M_c	地震个数	p 值	M_c	地震个数	p 值	M_c	地震个数	p 值
半日潮	$M_L2.0$	6227	0.9130	$M_L2.0$	4924	0.598	$M_L1.0$	7677	0.562
	$M_L2.5$	2436	0.8070	$M_L2.5$	1959	0.501	$M_L1.5$	3334	0.077
	$M_L3.0$	932	0.8670	$M_L3.0$	752	0.547	$M_L2.0$	1303	0.568
半月潮	$M_L2.0$	6227	0.6770	$M_L2.0$	4924	0.193	$M_L1.0$	7677	0.117
	$M_L2.5$	2436	0.0810	$M_L2.5$	1959	0.008	$M_L1.5$	3334	0.050
	$M_L3.0$	932	0.0002	$M_L3.0$	752	4.15×10^{-5}	$M_L2.0$	1303	0.043

表 5 晋冀蒙地区不同震级档潮汐体应力 Schuster 检验统计结果

震级档	地震个数	p 值	
		半日潮	半月潮
$M_L3.0 \sim 3.9$	786	0.699	0.005
$M_L4.0 \sim 4.9$	122	0.008	0.090
$M_L5.0 \sim 6.9$	24	0.495	0.127

不同的调制特征, $M_L3.0 \sim 3.9$ 震级档的地震活动主要受到半月潮调制作用, 而 $M_L4.0 \sim 4.9$ 震级档的地震活动主要受到半日潮调制作用。

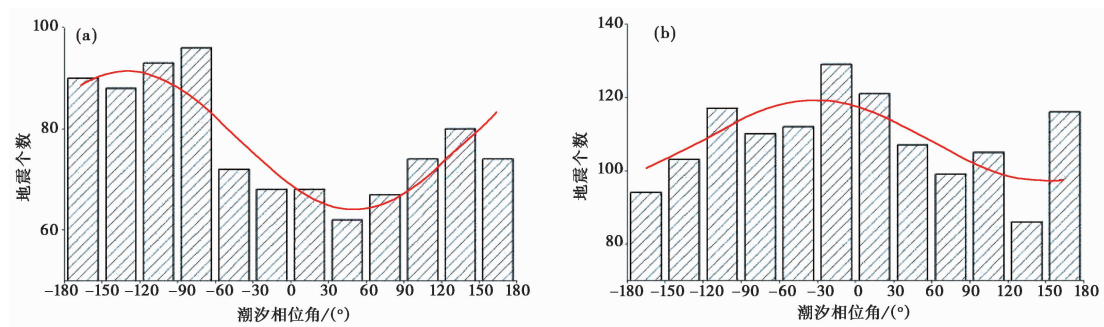
确定晋冀蒙地区 1970—2022 年 932 个 $M_L3.0$ 以上地震的相位角后, 以 30° 为间隔进行直方图统计(图 7), 图中红色曲线为基于公式 $P(\theta) = P_0 + P_1 \cos(\theta - \varphi)$ 得到的频次余弦拟合曲线(Cadicheanu et al, 2007), 其中 θ 为相位角, P_0 为地震平均频度, P_1 和 φ 为曲线振幅及最大值对应的相位角。

全时段中, 以 $M_L3.0$ 为震级下限的月尺度潮汐相位角频次拟合曲线起伏较大, 峰值在 -150° , 相位在 $-180^\circ \sim -60^\circ$ 内发生的地震数量较多。由图 7 可知, 潮汐相位在 $-180^\circ \sim 0^\circ$ 位于震源潮汐力增强时段, 研究区域的拉张—松弛—卸载作用逐渐增强, 潮汐体应力的增强有利于晋冀蒙地区 $M_L3.0$ 以上地震的发生。而在 2009 年之后, $M_L2.0$ 以上地震的月尺度潮汐相位角呈现不同的特征, 优势发震相位为 -30° , 地震多发生在 0° 附近, $\pm 180^\circ$ 附近相对较少, 定性说明小震个数随潮汐体应力的增大而增加, 说明 2009 年之后晋冀蒙地区的小震活动主要受大潮调制。

2.3 冀鲁豫地区

对冀鲁豫地区不同时段、不同震级下限的地震活动进行 Schuster 检验(表 6), 1970—2022 年, 以最小完备性震级 $M_L2.5$ 为震级下限, 日尺度潮汐体应力 p 值计算结果为 0.272, 月尺度潮汐体应力 p 值计算结果为 0.617, 均大于触发阈值 0.05; 以 $M_L3.0$ 为震级下限的日尺度潮汐体应力的 p 值计算结果为 0.035, 小于触发阈值 0.05。不同时间段的计算结果中有多个日尺度潮汐体应力的 p 值计算结果小于触发阈值 0.05, 这表明冀鲁豫地区的地震活动在日尺度上明显受到潮汐调制作用。

对冀鲁豫地区 1970—2022 年 615 个 $M_L3.0$ 为震级下限的相位角以 30° 为间隔进行直方



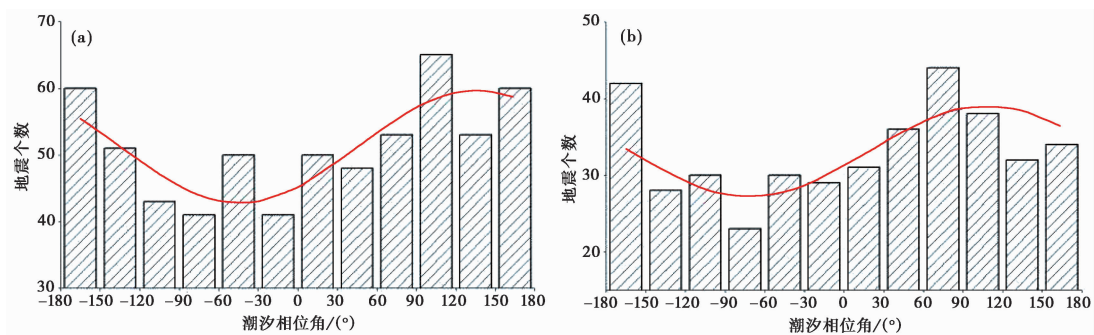
注：(a)为全时段以 $M_L 3.0$ 为震级下限结果；(b)为 2009—2022 年以 $M_L 2.0$ 为震级下限结果；红色曲线为拟合曲线。

图 7 晋冀蒙地区月尺度潮汐相位角直方图及拟合曲线

表 6 冀鲁豫地区不同震级下限潮汐体应力 Schuster 检验统计结果

周期波	全时段 (1970—2022 年)			时段 I (1970—2014 年)			时段 II (2015—2022 年)		
	M_c	地震个数	p 值	M_c	地震个数	p 值	M_c	地震个数	p 值
半日潮	$M_L 2.5$	1813	0.272	$M_L 2.5$	1686	0.4680	$M_L 1.0$	1775	0.127
	$M_L 3.0$	615	0.035	$M_L 3.0$	569	0.0500	$M_L 1.5$	827	0.203
	$M_L 3.5$	207	0.080	$M_L 3.5$	190	0.0070	$M_L 2.0$	360	0.024
半月潮	$M_L 2.5$	1813	0.617	$M_L 2.5$	1686	0.5930	$M_L 1.0$	1775	0.105
	$M_L 3.0$	615	0.921	$M_L 3.0$	569	0.8414	$M_L 1.5$	827	0.141
	$M_L 3.5$	207	0.545	$M_L 3.5$	190	0.5490	$M_L 2.0$	360	0.269

图统计(图 8),发现日尺度潮汐相位角在 $\pm 180^\circ$ 和 90° 附近集中,多发生在半日潮谷值附近,说明地震活动主要受小潮调制,2014 年之后 $M_L 2.0$ 以上地震的日尺度潮汐相位角呈现基本相同的特征。



注：(a)为全时段以 $M_L 3.0$ 为震级下限结果；(b)为 2015—2022 年以 $M_L 2.0$ 为震级下限结果；红色曲线为拟合曲线。

图 8 冀鲁豫地区日尺度潮汐相位角直方图及拟合曲线

3 讨论与结论

本研究采用 Schuster 检验方法,对河北及邻区中小地震活动受固体潮触发情况进行分

析,得到如下结论:

(1)不同区域呈现不同的固体潮调制特征。晋冀蒙地区的地震活动受半月潮调制作用较为显著,冀鲁豫地区的地震活动受半日潮作用较为显著,而京津唐地区的地震活动与固体潮汐之间的相关性较小。对于不同的区域,由于地质构造不同以及断层错动方式、断层方向的差异,因此潮汐对地震的触发作用具有一定的区域性(赵娟等,1999)。晋冀蒙地区位于华北构造块体北缘,是阴山—燕山 EW 向构造带和 NE 向山西断陷带的交汇部位,该区的断裂以 NE-NEE 向为主,断裂性质为张性倾滑,区域地震活动主要集中在大同和张北老震区;京津唐地区处于 NW 向张家口—渤海地震带和 NE 向华北平原地震带的交汇部位,主要受 NNE 和 NE 向断裂控制,断裂力学性质为右旋走滑,地震活动主要集中在唐山老震区。冀鲁豫地区位于太行山断块、冀鲁断块、皖豫断块交汇处,受 NW 和 NE 向断裂共同控制,断裂力学性质为左旋走滑,地震活动主要集中在邢台老震区(朱红彬等,2010)。理论上,潮汐引力增强有利于张性区域地震活动,潮汐引力减弱有利于挤压走滑区域地震活动,即当潮汐力变化加强了原有构造力的作用时,有利于小震活动,这与晋冀蒙、冀鲁豫地区的调制特征一致。

(2)同一区域不同时段、不同震级的地震活动呈现不同的固体潮调制特征。1970—2022 年,晋冀蒙地区以 $M_L 3.0$ 为震级下限的月尺度潮汐相位角统计显示,相位在 $-180^\circ \sim -60^\circ$ 内发生的地震数量较多,即潮汐力的增强时段;而 2009 年之后, $M_L 2.0$ 以上地震的月尺度潮汐相位角呈现不同的特征,优势发震相位为 -30° ,地震多发生在 0° 附近,即小震活动主要受大潮调制。对不同区域、不同时段和不同震级下限的地震活动进行 Schuster 检验,得到的 p 值结果也不尽相同,即不同区域、不同时段地震受潮汐触发的震级有所不同。

日月引潮力可能是地震发生的一个重要的外部影响因子,但是其自身的孕育和发展则起到更为重要的作用。例如,京津唐地区地震活动十分活跃,但统计分析结果显示该区地震活动与固体潮汐之间的相关性较小,这也意味着固体潮汐对地震的发生可能并不起决定性的主导作用。此外,固体潮的触发作用具有一定的区域性和时间性,不同区域、不同时段地震受潮汐触发的震级也有所不同,这可能关系到地震的成因及孕震机制,值得进一步深入研究。

致谢:审稿专家对论文提出了宝贵意见,在此表示感谢。

参考文献

- 陈学忠,李艳娥,郭祥云. 2009. 中国西部北纬 35° 线附近地区 7.0 级以上强震分析. 地震, **29**(4): 107~116.
- 陈学忠,钟南才,丁鉴海. 1998. 华北地区地震活动的月相效应及其预测意义. 地震, **18**(4): 325~330.
- 杜品仁. 1999. 华北地区强震活动与月相的关系及其机制. 地球物理学报, **42**(增刊 I): 123~130.
- 韩颜颜,孟令媛,刘桂萍,等. 2017. 西北地区中强震前固体潮调制比时空特征分析. 地震学报, **39**(5): 738~750.
- 蒋长胜,吴忠良,庄建仓. 2013. 地震的“序列归属”问题与 ETAS 模型——以唐山序列为例. 地球物理学报, **56**(9): 2971~2981.
- 蒋海昆,黎明晓,吴琼,等. 2008. 汶川 8.0 级地震序列及相关问题讨论. 地震地质, **30**(3): 746~758.
- 李金,蒋海昆. 2011a. 潮汐触发地震研究进展综述. 地震, **31**(4): 36~47.
- 李金,蒋海昆. 2011b. 汶川地震余震活动固体潮调制的统计分析. 中国地震, **27**(4): 363~375.
- 李金,蒋海昆,桂荣,等. 2014. 新疆喀什-乌恰交汇区潮汐触发地震活动的统计检验. 中国地震, **30**(1): 64~73.

- 李金,向元,赵彬彬,等. 2016. 基于断层面的天山地区潮汐应力触发地震研究. 地震研究, **39**(2):230~238.
- 黎凯武. 2000. 中国大陆成组强震与强震调制比分析. 地震, **20**(增刊 I):44~50.
- 李梦圆,蒋海昆,宋金,等. 2021. 2020年西藏波密 $M_L 4.9$ 震群活动的潮汐触发特征. 中国地震, **37**(1):59~72.
- 李艳娥,陈学忠. 2018. 2008年汶川地震前地震的固体潮触发检验. 科学通报, **63**(19):1962~1970.
- 李志安,陈黎,韩延本,等. 1994. 触发地震的日月引潮力. 北京师范大学学报(自然科学版), **30**(3):368~372.
- 马青波,解朝娣,向元,等. 2018. 新疆2014年于田 $M_S 7.3$ 及2015年皮山 $M_S 6.5$ 地震及其余震序列与潮汐应力的触发关系研究. 地震研究, **41**(1):104~110.
- 王威中,殷志山. 1989. 我国西南地区地震与潮汐应力关系的探讨. 地壳形变与地震, **9**(1):13~20.
- 吴小平,黄雍,冒蔚,等. 2005. 云南地震的潮汐应力触发机制及相关天体位置图像. 地球物理学报, **48**(3):574~583.
- 吴小平,冒蔚,黄雍,等. 1999. 潮汐应力对发震断层作用的统计分析. 地球物理学报, **42**(增刊 I):65~74.
- 杨春艳,解朝娣,王先星,等. 2023. 云南腾冲地区地震的潮汐应力触发作用. 大地测量与地球动力学, **43**(4):420~424.
- 张国民,李丽,黎凯武,等. 2001. 强震成组活动与潮汐力调制触发. 中国地震, **17**(2):110~120.
- 张涵,解朝娣,闫如玉,等. 2019. 日本地震活动与潮汐相关性统计研究. 大地测量与地球动力学, **39**(11):1122~1126.
- 张晶,郗钦文,杨林章,等. 2007. 引潮力与潮汐应力对强震触发的研究. 地球物理学报, **50**(2):448~454.
- 赵娟,韩延本,李志安. 1999. 日月引潮力与华北地区的地震. 地球物理学报, **42**(增刊 I):24~29.
- 朱红彬,邢成起,李红,等. 2010. 华北构造区主要地震带分段与强震活动. 地震学报, **32**(6):705~717.
- Aki K. 1956. Some problems in statistical seismology. Zisin, **8**(4):205~228.
- Cadicheanu N, Van Ruymbek M, Zhu P. 2007. Tidal triggering evidence of intermediate depth earthquakes in the Vrancea zone (Romania). Nat Hazards Earth Syst Sci, **7**(6):733~740.
- Heaton T H. 1975. Tidal triggering of earthquakes. Geophys J Int, **43**(2):307~326.
- Heaton T H. 1982. Tidal triggering of earthquakes. Bull Seismol Soc Am, **72**(6A):2181~2200.
- Klein F W. 1976. Earthquake swarms and the semidiurnal solid earth tide. Geophys J Int, **45**(2):245~295.
- Lockner D A, Beeler N M. 1999. Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes. J Geophys Res, **104**(B9):20133~20151.
- Schuster A. 1897. On lunar and solar periodicities of earthquakes. Proc Roy Soc London, **61**(369~377):455~465.
- Tanaka S, Ohtake M, Sato H. 2002. Spatio-temporal variation of the tidal triggering effect on earthquake occurrence associated with the 1982 South Tonga earthquake of $M_w 7.5$. Geophys Res Lett, **29**(16):3-1~3-4.
- Tanaka S, Ohtake M, Sato H. 2014. Tidal triggering of earthquakes in Japan related to the regional tectonic stress. Earth Planets Space, **56**(5):511~515.
- Tanaka S, Sato H, Matsumura S, et al. 2006. Tidal triggering of earthquakes in the subducting Philippine Sea plate beneath the locked zone of the plate interface in the Tokai region, Japan. Tectonophysics, **417**(1~2):69~80.
- Tsuruoka H, Ohtake M, Sato H, 1995. Statistical test of the tidal triggering of earthquakes; contribution of the ocean tide loading effect. Geophys J Int, **122**(1):183~194.
- Vidale J E, Agnew D C, Johnston M J S, et al. 1998. Absence of earthquake correlation with Earth tides; an indication of high preseismic fault stress rate. J Geophys Res, **103**(B10):24567~245723.

Statistical Analysis on Earth Tide Triggering of Earthquakes in Hebei Province and Its Adjacent Areas

Guo Lei^{1,2)}, Meng Lingyuan³⁾

1) Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China

2) Hebei Hongshan Thick Sediments and Seismic Hazards National Observation and Research Station, Xingtai 055350, Hebei, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract A statistical analysis of earthquake activity triggered by earth tides in Hebei Province and its adjacent areas was conducted using Schuster's test on both daily and monthly scales, with tidal body stress as the basis for calculations. The results indicate that different regions exhibit distinct characteristics of earth tide triggering. In the boundary area of Shanxi, Hebei, and Mongolia, seismic activity is significantly triggered by earth tides on a monthly scale. In contrast, in the Hebei, Henan, and Shandong areas, seismic activity is significantly triggered on a daily scale. However, the correlation between earth tides and seismic activity in the Beijing-Tianjin-Tangshan area is minimal. Additionally, earthquakes in different regions and at different times are triggered by earth tides of varying magnitudes. Seismic activity of different magnitudes during different time periods within the same region also shows varying triggering characteristics related to earth tides.

Keywords: Hebei and its adjacent areas; Tidal triggering; The Schuster's test