

内蒙古东部地区波速比变化特征研究

张 晖^{1,2}, 高立新², 韩晓明²

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:以内蒙古地震监测台网的监测能力和资料完整性为基础,结合内蒙古东部地区($41^{\circ}\sim 51^{\circ}\text{N}$, $114.5^{\circ}\sim 124.6^{\circ}\text{E}$)实际地震地质构造特点,选取了内蒙古东部地区($41^{\circ}\sim 51^{\circ}\text{N}$, $114.5^{\circ}\sim 124.6^{\circ}\text{E}$) 2008-2012年的 $M_{\text{L}}\geq 2.0$ 地震作为研究对象,利用多台和达法计算得出了该区域的平均波速比及其变化特征。通过分析该地区两次中等地震震例,发现内蒙古东部地区在中等地震前后波速比时间变化存在显著异常,符合“下降—低值—恢复—发震”的规律,且存在着震后异常期的变化;在对该区域内波速比绘制空间等值线后,发现该区域内波速比高值主要是沿着大兴安岭分布,其空间分布基本呈现东低西高、北低南高的态势。综合研究了区域地震地质背景和最近一两年研究区域内波速比变化,得出内蒙古东部地区地下介质的应力变化比较显著,具备发生中强地震的地质构造条件。

关键词: 内蒙古东部地区; 波速比; 时空变化

中图分类号: P315.3¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)04-921-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.921

The Variation of Wave Velocity Ratio at the Eastern Region of Inner Mongolia

ZHANG Hui^{1,2}, GAO Li-xin¹, HAN Xiao-ming¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou Gansu 730000, China;

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

Abstract: From 2008 to 2012, the integrity of observation data of earthquake monitoring network in Inner Mongolia was above 96.3%, and the monitoring ability and data integrity at eastern Inner Mongolia ($41^{\circ}\sim 51^{\circ}\text{N}$, $114.5^{\circ}\sim 124.6^{\circ}\text{E}$) were more outstanding than other regions. Combined with the actual geological structure and seismic activity characteristics of eastern Inner Mongolia, we select the earthquakes of $M_{\text{L}}\geq 2.0$ at study area ($41^{\circ}\sim 51^{\circ}\text{N}$, $114.5^{\circ}\sim 124.6^{\circ}\text{E}$) from 2008 to 2012 to calculate the average wave velocity ratio there and its variation. As the comprehensive analysis on existing research data may impact the uncertainty of calculation, we use Multi-station method to make the results more accurate and reliable. Calculation results show that the average wave velocity ratio at study area from 2008 to 2012 is 1.709 4, and basic range is between 1.690 5~1.732 8. Through the analysis of two moderate earthquakes at research area, we find that the temporal change of wave velocity ratio at the eastern region of Inner Mongolia show some significant anomaly, which satisfies the law of "decline - low value- recover- seismogenic" and there is a change in the abnormal period

收稿日期: 2013-06-24

基金项目: 地震行业科研专项(201208009); 地震科技星火计划(XH12009)

作者简介: 张 晖(1982-),男(汉族),内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,工程师,主要从事地震监测、地震活动方面的研究。

E-mail: zhanghui218@163.com.

after the earthquake, the change rate is about 3%. After drawing the spatial contour of wave velocity ratio at that region, we found that the high values within the area are mainly distributed along Daxinganling, showing the spatial distribution of a trend of low West high East and low North high South. In terms of the geological structure, high values of wave velocity ratio in a range of 1.73 ~ 1.78 are mainly concentrated in Balihan fault, Beipiao-Chaoyang fault and Chifeng-Kaiyuan fault. Combined with the seism-geological background of study area and the change of wave velocity ratio in recent one or two years, it could be concluded that the stress variation of underground medium in eastern Inner Mongolia is more significant, with certain geological conditions of the occurrence of moderate and strong earthquake. Because the data we use here do not contain the analog seismic record before 2008, it does not show the complete seismic record and the whole change trend of wave velocity at eastern Inner Mongolia, moreover, there are few seismic stations at eastern Inner Mongolia region and they are distributed very unevenly, the results are just preliminary. With the enrichment of digital observation data in the future, we can do more detailed studies in this area.

Key words: the eastern region of Inner Mongolia; wave velocity ratio; temporal and spatial variation

0 引言

在分析预报中应用地震波速或波速比的变化作为监测方法来预测未来较大地震是一种重要的方法^[1]。国内外的一些震例说明,较大地震前地震波速或波速比出现较明显的异常变化^[2-3],一些用波速比的异常变化预测未来地震收到了较好的效果。

本文利用多台和达法计算了内蒙古东部地区地震的波速比,得出该地区的平均波速比值和变化范围。以2009年12月21日内蒙古通辽市科尔沁左翼中旗 $M_s4.7$ 地震和2011年07月22日内蒙古呼伦贝尔市陈巴尔虎旗 $M_s4.2$ 地震为例,探讨中等地震前后波速比的变化特征。研究了近一两年这一地区波速比变化趋势,绘制了该区域内波速比空间等值线,结合该区域的地质构造条件分析该区域内波速比的空间分布特征。为判断中强地震的发生提供分析依据。

1 内蒙古东部地区地震地质背景

本研究范围为 $41^\circ\sim51^\circ\text{N}$, $114.5^\circ\sim124.6^\circ\text{E}$,是华北板块与东北板块的交汇处,涉及的一级构造单元有:内蒙古地槽褶皱系、吉—黑地槽褶皱系和中—朝准地台。各构造单元呈现出不同的、各具特色的构造特征,既有长期隆起区,又有长期下降区,构造形迹复杂,构造运动强烈。大兴安岭构造带是研究区内主要构造隆起带,其规模大、结构复杂,且活动程度高,对本区域各时期,特别是中新世以来的地层、构造、沉积建造、岩浆活动以及矿产的形成和新构造运动都起着十分重要的控制作用。本区域基本构造格架为燕山运动时期所奠定,后受喜马拉雅运动的影响和改造形成现在的地质构造形态和地貌景观。

据历史地震记载及近代中强地震记录,区域内共发生 $M_s\geq4.0$ 地震35次,其中大于 $M_s\geq5.0$ 地震20次,大于 $M_s\geq6.0$ 地震3次,且 $M_s\geq5.0$ 地震主要集中于该区域东部和北部的阿伦河断裂、雅鲁河断裂一带,以及东南部的八里罕断裂、赤峰—开原断裂和北票—朝阳断裂一带。这是该区域历史地震发生的关键因素,同时也表明该区域内具备发生中强地震的地质构造条件^[4]。

2 原始资料分析

本研究所用资料来自中国地震台网中心的“全国统一编目”地震观测报告。在波速比计算之前,需要对所用资料进行筛选和预处理,参照前人的筛选方式^[5],本研究考虑了如下几个影响波速比的因素:

(1) 震源深度与波速比的关系。有些研究者发现,虽然 $V_p/V_s > 2.0$ 时有震源深度越浅波速比较大的现象,但在 $1.50 < V_p/V_s < 1.90$ 范围93%的地震震源深度和波速比无明显的关系^[5],而且研究人员对这一地区及附近区域也做过一些研究,所得的波速比结果均未超出1.90^[2],所以,本研究中未考虑震源深度的影响。

(2) 震相辨别和读数精度的影响。这一因素主要是受到观测手段和台网监测能力的影响。进入数字化观测以来,震相的读数精度可以达到0.01~0.02 s,完全符合计算波速比的要求^[5]。而震相的辨别主要是受到台网的监测能力的影响,自2008~2012年的“十五”数字台网建成后,内蒙古及邻区地震监测能力得到了整体大幅度的提高,有效地克服了内蒙古行政区划狭长而导致台站布局不合理的现状(图1)^[6-7],而东部地区台网的布局比其他区域分布更为均匀,所以选择东部地区做研究从台网的布

局来说,可以满足计算的要求。

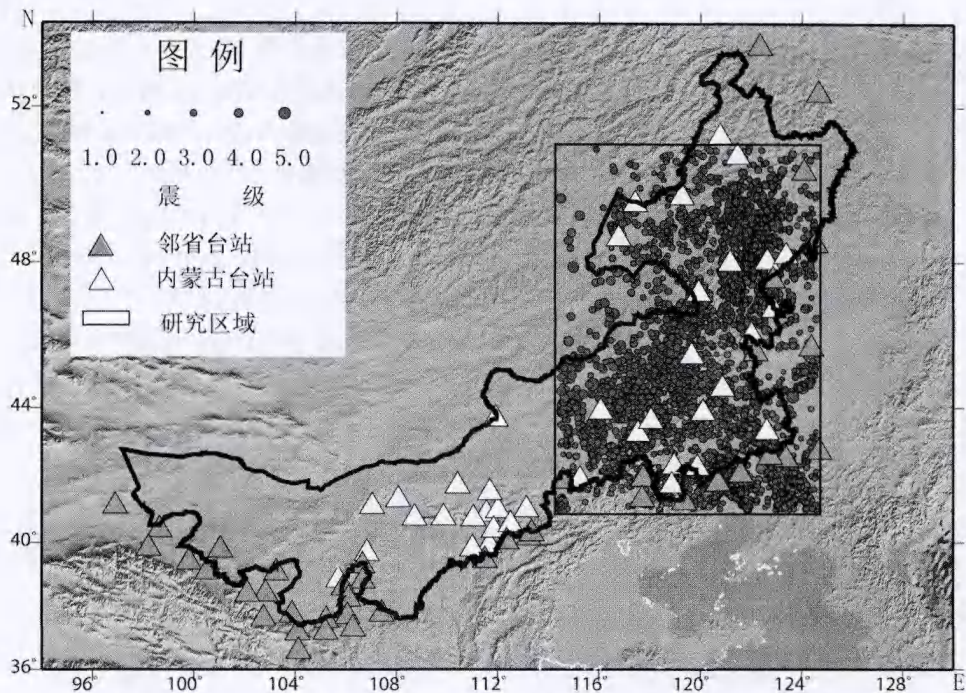


图1 内蒙古地区地震台站分布及研究区域内震中分布(2008-01-01—2012-12-31)

Fig.1 Distribution of seismic stations in Inner Mongolia and the epicenter distribution within the study area (2008-01-01—2012-12-31)

通过内蒙古地区与周边省局的数据共享,本次研究区域内的监测能力可以达到 $M_{2.5}\sim 3.0$,部分地区可达到 $M_{2.7}\sim 3.0$ 。所以,本文所研究的观测记录均选用 $M_{2.5}$ 以上的观测报告。为了使得研究结果更加精确,剔除单台的影响,我们选择了至少有4个台站清晰记录到地震的观测报告,同时仅选用清楚的PG和SG震相记录,最大程度上消除了由于震相和读数所造成的影响。

(3) 时间服务的影响。主要有两点:一是各地震台的时间服务系统不同;二是地震台的时间服务由于种种原因不稳定。前者是系统误差,后者可不用时间服务不稳定的某台站或某时段的数据^[5]。目前台站、台网使用的数字化记录仪的授时均利用GPS授时,同时还建立了网络授时服务器,使得现有的授时误差每天小于或等于0.1 s,对地震预报中需要的动态变化影响不大。

(4) 介质存在横向不均匀性。以和达线的方法计算波速比是以均匀介质为前提,若介质存在不均匀性,近台站处在低速区波速比就偏大,远台站处波速比就偏小。为了减少这种影响可以使用不同台站组合的计算,在差异比较大时采用与孕震区尺度大致相当的小台网或近台计算的数据,以尽量排除由于非孕震原因引起的波速变化和避免大面积的平均掩盖了孕震信息^[5]。本次研究所使用的数据均控制在近台数据,控制标准是选择的观测报告均满足 $t_s - t_p \leq 20$ s,可使震中距控制在190 km以内,同时尽

量选取至少有4个台站分布在以震中为原点的四个象限的观测报告,以减少介质横向不均匀性的影响。

3 内蒙古东部地区平均波速比时空变化

3.1 波速比计算原理

本文使用的多台和达法是由日本地震学家和达清夫在1928年提出,其基本原理可参见王林瑛等的《文安地震前后首都圈分区波速比时变特征》^[9]。在假定震源区到地表为理想均匀弹性介质的条件下,纵波速度 V_p 和横波速度 V_s 与介质泊松比 σ 、杨氏模量 E 和介质密度 ρ 之间的关系为

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left(1 + \frac{2\sigma}{1 - \sigma - \sigma^2} \right)}; \tag{1}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \sigma)}}; \tag{2}$$

$$\frac{v_s}{v_p} = \sqrt{\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma}}; \tag{3}$$

式中: V_p/V_s 为波速比,是 σ 的函数。 σ 泊松比=单位直径缩短/单位长度伸长,即 $(Dd/d)/(DL/L)$ 。 E 为应力(拉)/应变(线) $= (F/Q)/(DL/L)$ 。 ρ 为介质密度,且介质的弹性特征决定传播速度^[10]。具体计算^[9]:

$$v_p/v_s = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta T_i)^2}{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Delta T_i \Delta T_j} \quad (4)$$

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n (t_{pi} - \bar{t_p})(\Delta t_i - \bar{\Delta t_i})}{[\sum_{i=1}^n (t_{pi} - \bar{t_p})^2 \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \bar{\Delta t_i})^2]} \quad (5)$$

$$r = \left[\frac{v_p}{v_s} - 1 \right]^2 \left\{ \frac{n \sum_{i=1}^n (\delta t_{pi})^2}{(n-2) [n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta t_i)^2]} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

其中 R 为相关系数; r 为计算误差。

3.2 资料选取

研究所使用资料为2008–2012年的地震观测报告, 选用 $M_i \geq 2.0$ 以上地震记录800余条。根据内蒙古东部地区及周边地区台站的分布, 考虑计算结果的精度和可信度, 使用资料经过了两次筛选。首先要求地震至少有4个以上台站记录到, 且尽量选取台站均匀分布在以震中为原点的四个象限中; 采用的地方震资料震相初动清晰, 易于分辨, 即震相的变化幅度超出背景变化幅度的两倍; 所选台站的 $t_s - t_r$ 在20 s 以内, 可减少传播路径上介质对波速比的影响; 通过以上条件限制, 从800余条记录中初步挑选出197条记录进行计算。其次是进行计算结果筛选, 要求在能计算出波速比的地震中, 选取波速比计算误差 ≤ 0.05 和相关系数 ≥ 0.998 的地震事件, 经过这两次的筛选最终得到了63条计算结果。

3.3 计算结果

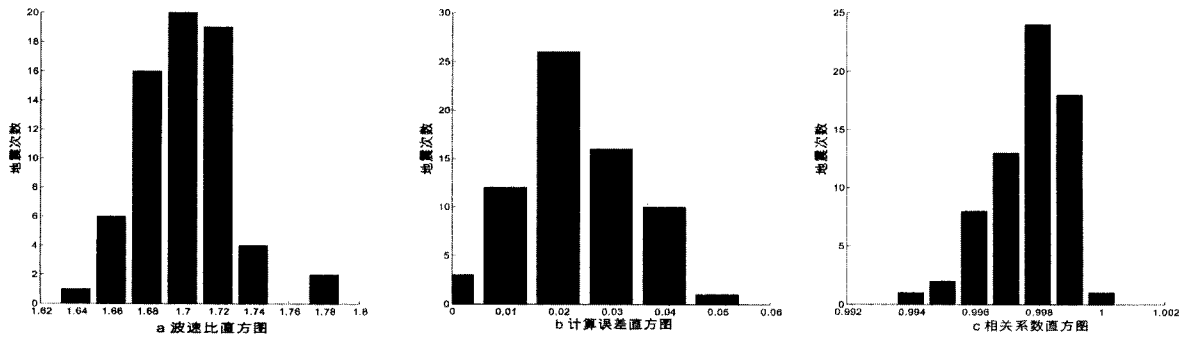


图3 波速比计算数据信度直方图
Fig. 3 Reliability histogram of velocity ratio calculating data

3.4 震例分析

对研究时段内2009年12月21日科尔沁左翼中旗 $M_s 4.7$ 地震和2011年07月22日陈巴尔虎旗 $M_s 4.2$ 地震进行震前波速比变化的震例考察。

首先, 分析研究范围第一个地震前后波速比异常变化。如图4所示, 2009年4月波速比从之前的1.727 2降低到1.698 9, 降幅达到1.6%, 超出了基本波动范围, 之后开始回升, 在2009年5、6月时波速比又从之前的1.730 9

在经过两次筛选后得出的63条波速比结果的基础上, 得到内蒙古东部地区2008–2012年平均波速比为1.709 4, 波动范围在1.690 5–1.732 8之间, 最小值为1.669 4, 最大值为1.792 8。整体上看, 2009–2010年波速比变化幅度比较大, 最大和最小值均出现在这一时期; 进入2011年后波速比变化相对平缓; 2012年开始, 波速比变化加剧, 且开始有上升的趋势(图2)。在研究时段内有两次中等以上地震发生, 分别是2009年12月21日科尔沁左翼中旗 $M_s 4.7$ 地震和2011年07月22日陈巴尔虎旗 $M_s 4.2$ 地震, 后续章节将对这两次震例前后的波速比变化进行详细的分析。

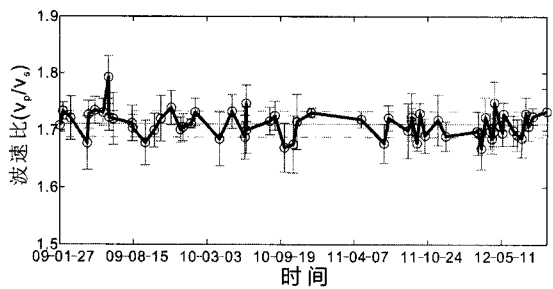


图2 研究区域平均波速比
Fig.2 Average velocity ratio of the study area

为检验计算所得的波速比、误差和相关系数的信度, 对以上3个参数进行统计分析。从图3(a)可以看出, 波速比84%以上集中在1.70–1.73之间; 图3(b)中, 误差60%以上小于0.03; 图3(c)中, 相关系数80%以上大于0.998, 说明获得的平均波速比数据信度比较高。

升高到1.788 5和1.792 8, 上升幅度达到了3.3%和3.6%, 之后开始下降, 到2009年10月达到低值1.699 4, 之后开始恢复, 到2009年11月时回到1.739 3, 之后发生了科尔沁左翼中旗 $M_s 4.7$ 地震。本次波速比的异常表现得十分明显, 异常持续时间将近7个月, 异常的总体变化趋势为“下降—上升—下降—回升—发震”, 这种变化形态与前人的研究很类似^[1]。
研究范围内第二次地震前的波速比异常变化也比较

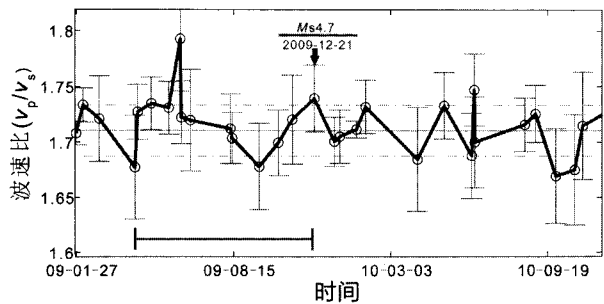


图4 2009年12月21日 $M_s4.7$ 地震前波速比异常变化
Fig.4 The abnormal changes of the velocity ratio before the december 21, 2009 $M_s4.7$ earthquake

明显。在图5可以看出,在2010年9月波速比由之前的1.725 5急剧降到1.669 4,下降幅度达到了3.3%,之后开始回升,在2011年3月又出现了一个低值1.697 0,之后又开始回升,到2011年6月时,波速比回升到1.705 5,之后发生陈巴尔虎旗 $M_s4.2$ 地震。这次异常持续近10个月,这次地震前波速比的总体变化趋势为“下降—低值—回升—发震”。

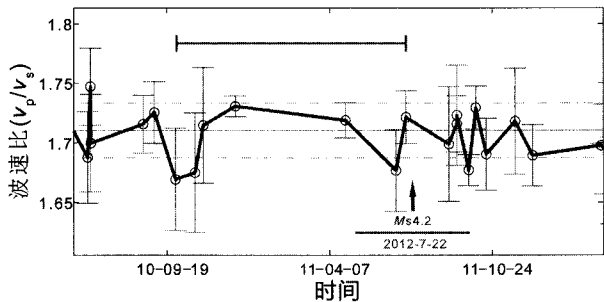


图5 2011年07月22日 $M_s4.2$ 地震前波速比异常变化
Fig.5 The abnormal changes of the velocity ratio before the July 22, 2011 $M_s4.2$ earthquake

通过分析,发现这两次地震前都有比较明显的波速比异常现象,两次地震前波速比变化总体呈现出“下降—低值—恢复—发震”的过程,异常持续时间在7到10个月左右,异常变化幅度一般在3%,特别是异常上升幅度一般都保持在3%左右,并且在“低值—恢复—发震”这个过程中,尤其是在发震前都出现了“低值—恢复”的过程,同时在两次地震之后波速比还出现了比较显著的低值变化,这种变化可以解释为一段“震后异常期”^[12]。总之,在研究范围内波速比能够表现出震前、震后的异常变化可以为今后地震活动的判断提供一定的依据。

3.5 未来震情初步分析

从图1可以看出,进入2012年以来,尤其是2012年4月开始(图6)波速比出现了短期的、较为极速的由低值到高值的变化,且变化幅度达到了2.9%,目前正在恢复上升中,这一现象很有可能就是“下降—低值—恢复—发震”的表现,而且进入2009年以来,该研究区域内没有 $M_s \geq$

5.0以上的地震发生,这一显著的地震活动特性也有可能预示着这一地区地下介质的应力正处于变化积累的过程中,需要今后进一步的关注。

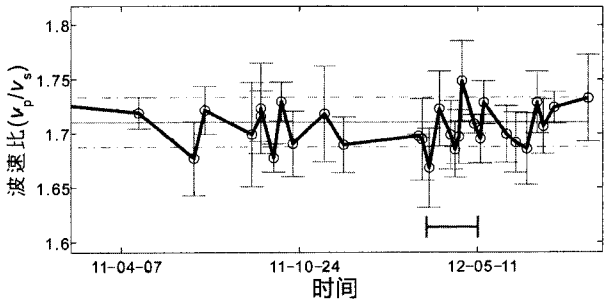


图6 2012年以来波速比变化形势
Fig.6 Situation of the Velocity ratio from 2012

为了更好的在空间上展示出波速比的分布情况,进而推断相应区域地下介质应力积累和释放情况,本文又对所得出的研究区域内的波速比按照步长为0.05,进行了空间等值线计算。从图7可以看出,波速比高值主要是沿着大兴安岭一带分布,波速比变化范围在1.685 6~1.784 0。在大兴安岭的南端,八里罕断裂、北票—朝阳断裂、赤峰—开原断裂一带出现波速比的高值区域,波速比值为1.73~1.78,超出线性弹性体的波速比1.73^[11];而在长春—四平断裂和扶余—肇东断裂一带出现了波速比的低值区域,基本在1.70以下,低于线性弹性体的波速比1.73。总体上来看,研究区域内呈现出东低西高、北低南高的态势。由此可见研究区内地下介质应力的作用是比较显著的,具有发生中强地震的地质构造条件。

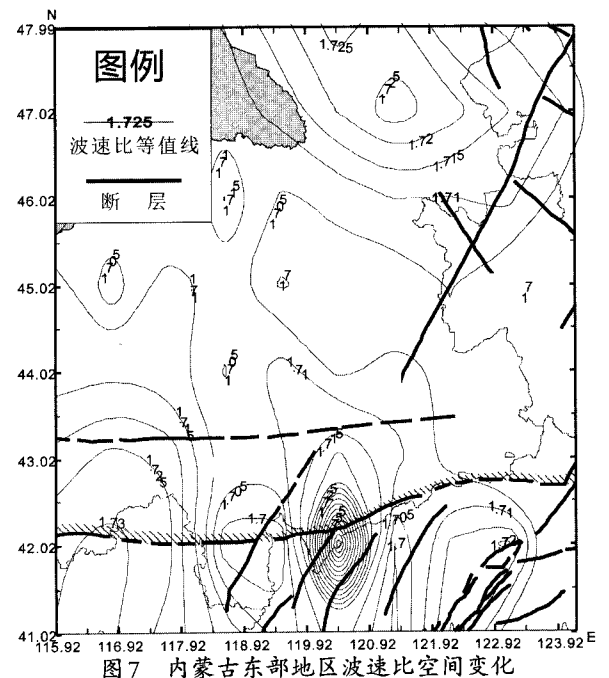


图7 内蒙古东部地区波速比空间变化
Fig.7 The spatial variation of the velocity ratio in the eastern part of Inner Mongolia

4 结论与讨论

通过对内蒙古东部地区近几年地震波速比计算,得出了内蒙古东部地区波速比平均值,并结合相关震例分析了波速比在地震前后的一些变化,从中得到了以下认识:

(1) 经计算得出2008—2012年内蒙古东部地区平均波速比为1.709 4,基本波动范围在1.690 5~1.732 8之间。结合2次震例分析,中等地震之前波速比显现出一定的异常变化特征,变化幅度在3%左右,其震前的总体变化符合“下降—低值—恢复—发震”这一趋势,持续时间在7~10个月左右。该地区的波速比震前异常变化特征对未来地震的预测具有一定的应用价值。

(2) 从内蒙古东部地区地质构造条件以及历史中强地震活动等因素上看,该区域具备发生中强地震的地质构造条件。分析了2012年以来研究区域内波速比时空变化情况,发现研究区域内存在波速比异常,且由于自2009年以来研究区域内没有发生过 $M \geq 5.0$ 地震,这也为该地区提供了可能的发震背景,需要对该区域内的波速比及其他地震学指标的变化趋势做更进一步的观察和研究。

(3) 根据波速比空间等值线的分布,可以发现研究区内呈现出东低西高、北低南高的态势。研究区内波速比的变化范围在1.685 6~1.784 0,波速比的高值沿大兴安岭一带分布,最高值在大兴安岭的南部,主要集中在八里罕断裂、北票—朝阳断裂、赤峰—开原断裂一带,变化范围在1.73~1.78,超过了线性弹性体的波速比1.73^[1]。波速比的低值主要在长春—四平断裂和扶余—肇东断裂一带,波速比值普遍在1.70以下,低于线性弹性体的波速比1.73。其余区域波速比值均在1.725左右变化,较为接近线性弹性体的波速比1.73。通过波速比空间等值线的研究,发现研究区内地下介质的应力变化比较显著,具备发生中强地震的地质构造条件。

(4) 由于研究所用资料是“十五”以后的地震观测报告,未包含以前模拟地震记录,所以并不能完整的显示有地震记录以来内蒙古东部地区波速比的变化趋势,并且内蒙古地区东部台站数量仍旧比较少,分布并不十分均匀,对区域的划分不够精细,所得结果仅是初步的。今后随着数字化观测数据的不断丰富,我们还可以对这一地区的波速比做更细致的研究。

参考文献(References)

- [1] 张洪艳,高金哲,卢燕红,等.吉林地区平均波速比的测定及研究[J].防灾减灾学报,2010,26(4):30-31.
ZHANG Hong-yan,GAO Jin-zhe,LIU Yan-hong,et al.The

Measurement and Research of Average Wave Velocity Ratio in Jilin Province[J].Journal of Disaster Prevention and Reduction,2010,26(4):30-31.(in Chinese)

- [2] 韩晓明,王鑫,郝美仙.赤峰-辽蒙交界地区地震活动性及平均波速比分析[J].高原地震,2009,21(3):11-16.
HAN Xiao-ming,WANG Xin,HAO Mei-xian. Analysis on Seismic Activity and Velocity Ratio(v_p/v_s) in Chifeng and Its Adjacent Regions[J].Plateau Earthquake Research,2009,21(3):11-16.(in Chinese)
- [3] 龙海英,聂晓红,唐兰兰.新疆乌苏5.1级地震前波速比异常震例研究[J].地震研究,2011,34(2):126-130.
LONG Hai-ying,NIE Xiao-hong,TANG Lan-lan.2011.Study of the Abnormity of Wave-velocity Ration before $M_s 5.1$ Wusu Earthquake in Xinjiang[J].Journal of Seismological Research,2011,34(2):126-130.(in Chinese)
- [4] 曹凤娟,焦明若,王亮,等.东北地区 $M \geq 5.0$ 地震前中等地震集中活动的震兆研究[J].地震工程学报,2013,35(2):385-393.
CAO Feng-juan, JIAO Ming-ruo, WANG Liang,et al. Research on the Precursor of Moderate Earthquakes before $M \geq 5.0$ Seismic in the Northeast Region[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(2):385-393. (in Chinese)
- [5] 蔡静观.波速比计算中的不确定因素和在地震预报中的应用[J].地震研究,2000,23(1):51-56.
CAI Jing-guan. Nondeterministic Factors in Calculation of v_p/v_s Ratio and Their Application to Earthquake Predictionhan [J]. Journal of Seismological Research,2000,23(1): 51-56. (in Chinese)
- [6] 韩晓明,曹孟娜,张帆.内蒙古呼和浩特-包头地区地震目录的完整性分析[J].西北地震学报,2012,34(1):93-98.
HAN Xiao-ming,CAO Meng-na,ZHANG Fan. Integrality Analysis of the Earthquake Catalog for Hohht-Baotou Area in Inner Mongolia[J].Northwestern Seismological Journal,2012,34(1):93-98.(in Chinese)
- [7] 刘芳,蒋长胜,杨彦明,等.内蒙古测震台网地震监测资料完整性分析[J].地震地磁观测与研究,2013,34(1):176-183.
LIU Fang, JIANG Changsheng,YANG Yanming, et al. Material Integrity Anailsys of Inner Mongolia Earthquake Networks[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2013,34(1):176-183.(in Chinese)
- [8] 刘芳,蒋长胜,张帆,等.基于EMR方法的内蒙古测震台网监测能力[J].地球科学,2013,38(6):1356-1362.
LIU Fang,Jiang Chang-sheng,ZHANG Fang, et al. Monitoring Capacity of Seismic Network in Inner Mongolia Region Based on EMR Method[J].2013,38(6):1356-1362.(in Chinese)
- [9] 王林瑛,郭永霞,刘芳,等.文安地震前后首都圈分区波速比时变特征[J].地震学报,2008,30(3):240-253.
WANG Lin-ying,GUO Yong-xia,LIU Fang, et al.Temporal v_p/v_s

- v_s Variation Characteristics in Different Zones of China's Capital Area before and after 2006 Wen'an Earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2008,30(3):240-253. (in Chinese)
- [10] 张小涛,韩丽萍,张新东,等.河北邯郸-邢台地区波速比和泊松比分布特征研究[J]. *西北地震学报*, 2012,34(1):84-87.
ZHANG Xiao-tao, Han Li-ping, ZHANG Xin-dong, et al. Distribution Characteristics of Wave Velocity Ratio and Poisson's Ratio in Handan-Xingtai Areas, Hebei Province[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2012,34(1):84-87. (in Chinese)
- [11] 冯德益.地震波速异常 [M].北京,地震出版社,1981:84-116.
- FENG De-yi. *Seismic Velocity Anomalies*[M]. Beijing:Seismological Press, 1981:84-116. (in Chinese)
- [12] 冯德益,郑斯华,盛国英,等.我国西部地区一些强震及中强震前后波速异常的初步研究(一)--波速比异常[J]. *地球物理学报*, 1976,19(3):196-205.
FENG De-yi, ZHENG Si-hua, SHENG Guo-ying, et al. Preliminary Study of the Velocity Anomalies of Seismic Wave before and after Some Strong and Moderate Earthquakes in Western China (I)-the Velocity Ratio Anomalies[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1976,19(3):196-205. (in Chinese)