

王亚茹、王想、官猛等,2016,河北及邻区平均波速比变化特征分析,中国地震,32(4),747~755。

河北及邻区平均波速比变化特征分析

王亚茹 王想 官猛 郭蕾 刘晓丹

河北省地震局,石家庄市槐中路 262 号 050021

摘要 用和达法计算河北及邻区地震波速比并按照不同震级不同窗口作滑动平均。通过对唐山地区波速比变化特征与中强地震对应关系的定性分析,发现 $M_L \geq 1.5$ 地震波速比曲线与 $M_L \geq 4.0$ 的地震对应较好,提出异常指标进行定量统计得到该区波速比异常与地震的对应关系和预报效能;按照同样的思路对河北另外 3 个地区进行分析,发现各分区波速比异常既有共性特征也有差异。

关键词: 波速比 异常 中等地震 预报效能

[文章编号] 1001-4683(2016)04-0747-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震波携带了地球内部的大量信息。在地震的孕育过程中,孕震区介质的物理状态会产生一系列变化,如发生微破裂、扩容、塑性硬化及相变等,地震波通过震源区时,波速也会发生变化,这是利用波速比异常预测地震的重要依据(冯德益,1981)。

1956 年日本地震学家早川正己(李善邦,1981)首次发现震前波速比异常现象,随后各国学者(Semenov et al,1969;Kanamori et al,1976)对波速比异常现象进行研究并发现了一些地震的波速比异常实例,为解释其变化机理,Nur 等(1972)提出“扩容-流体扩散”模式解释波速比变化过程。但是一些学者(McEvilly et al,1974;Mogi et al,1985)也提出了相互矛盾的结果。近年来,随着观测条件的显著改善和新技术方法的引入,地震数据精度不断提高,对中强地震前后波速比变化现象和特征的研究又引起了广泛关注(Nakamura et al,2002)。其中,可控震源实验表明地壳内确实发生了可测的波速变化(Korneev et al,2000),而利用“重复地震”的震相延迟时间变化也得到了一些强震前震源区明显的波速比变化(Schaff et al,2004)资料。在我国,不同学者对波速比也开展了广泛研究与讨论,得到了不同区域中强地震前后地震波速变化的震例(蔡静观等,2000;刁桂苓等,2005;黎明晓等,2006;王林瑛等,2014)并对波速比异常给予了肯定。

[收稿日期] 2015-06-03; [修订日期] 2016-06-06

[项目类别] 河北省科技支撑计划项目:河北震后快速响应辅助决策系统建设(15275402D)、河北省地震局地震科技星火计划重点项目“晋冀蒙交界区临时测震台网建设运行及强震背景跟踪研究(DZ20150428102)”河北省地震局科技星火计划“基于 CAP 方法反演河北地区中等地震震源机制的研究(DZ20150417012)”共同资助

[作者简介] 王亚茹,女,1984 年生,工程师,主要从事地震测震学研究。E-mail:wangyr24@163.com

王想,通讯作者,女,1980 年生,硕士,高级工程师,主要从事地震预测与数字地震学研究。

E-mail:wangx@eq-he.ac.cn

1 研究内容与方法

1.1 研究区的选择

河北地区地质构造复杂,区内主要包括张家口-渤海地震带与河北平原地震带,近年来随着河北地震台网建设的不断完善,地震数据的精度不断提高,为本研究提供了高质量的数据资料。本文将研究区域分为4部分(图1),分别为晋冀蒙地区(38.5°~41.5°N,113°~115.5°E)、京津地区(38.5°~41.5°N,115.5°~117.5°E)、唐山地区(39°~41°N,117.5°~119.5°E)以及河北南部地区(35.5°~38.5°N,113°~116°E),通过分析这4个地区地震波速比的时序变化特征,讨论其与中强地震之间可能存在的关系。

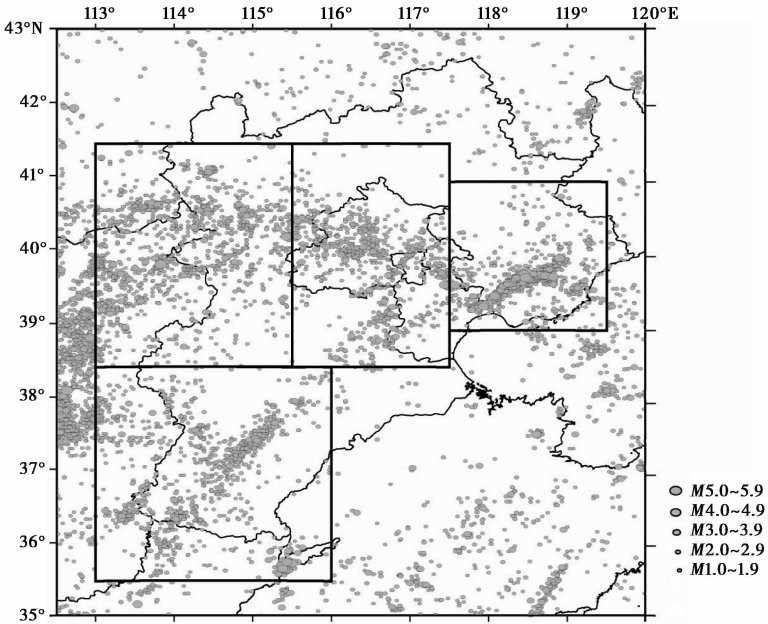


图1 研究区地震震中分布

1.2 应用和达法计算波速比

地震的纵波与横波的速度之比即为波速比,用 V_p/V_s 表示,平均波速比可由(1)式求得,式中, n 为观测台站总数, T_{pi} 和 $T_{(S-P)i}$ 分别为第 i 台站的 P 波观测到时以及 S 波、P 波到时差。

$$T_{(S-P)i} = K(T_{Pi} - T_0) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

多台观测可用最小二乘拟合求 K , K 为和达直线的斜率,故波速比可表示为

$$\frac{V_p}{V_s} = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n T_{(S-P)i} T_{Pi} - \sum_{i=1}^n T_{(S-P)i} \sum_{i=1}^n T_{Pi}}{n \sum_{i=1}^n T_{Pi}^2 - (\sum_{i=1}^n T_{Pi})^2} \quad (1)$$

其误差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (T_{(S-P)i} - T'_{(S-P)i})^2}{n - 2} \frac{1}{n \sum_{i=1}^n T_{Pi}^2 - (\sum_{i=1}^n T_{Pi})^2}}$$

其中, $T'_{(s-p)_i}$ 是理论计算值。相关系数的计算公式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{Pi} - \overline{T_{Pi}})(\Delta T_i - \overline{\Delta T_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{Pi} - \overline{T_{Pi}})^2 \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \overline{\Delta T_i})^2}}$$

2 数据处理

本文搜集并整理了河北省地震台网 2006~2016 年 2 月的地震数据,选择最少有 4 个台站记录到的、到时差 ≤ 20 s 的地震走时数据,利用多台和达法计算波速比,为提高波速比的计算精度及稳定性,择其相关系数大于 0.98,误差小于 0.05 的 8033 个地震波速比数据(图 2(a)),这些数据基本为 1.65~1.75,均值为 1.708,震级 $M_L = 1.0 \sim 2.0$,波速比与震级之间没有明显的对应关系(图 2(b));计算结果的精度与所选台站个数有关,台站越多,波速比的离散程度越小;2006~2009 年波速比的相关系数有一定波动,2009 年之后相关系数较好。

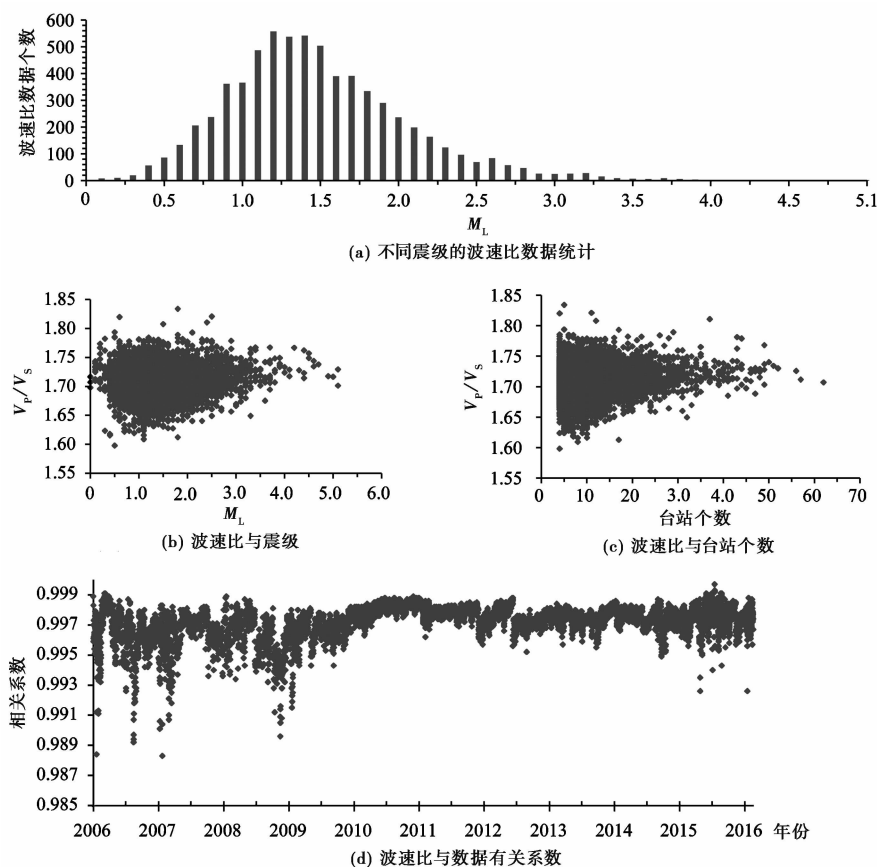


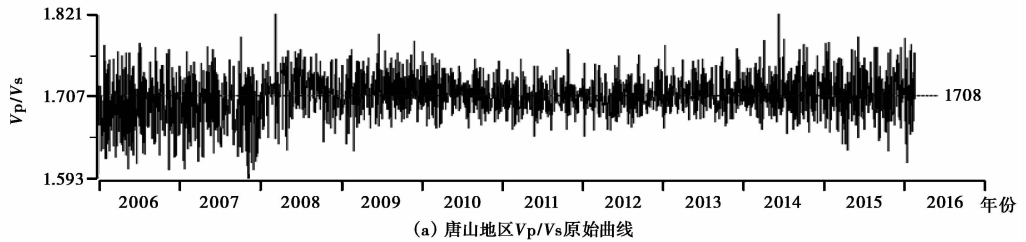
图 2 波速比与震级、台站个数、相关系数的关系

3 结果分析

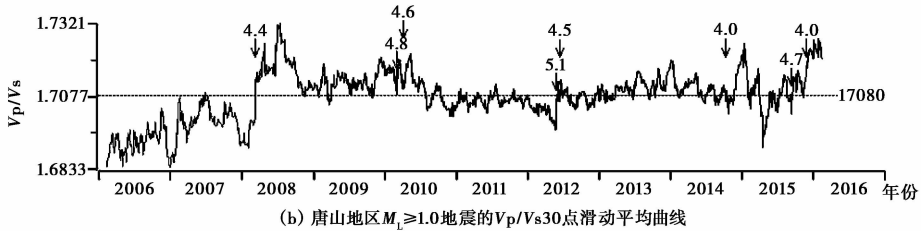
对唐山地区的波速比滑动曲线的分析如下,对另外 3 个分区按照同样的思路进行。

3.1 唐山地区的波速比变化特征

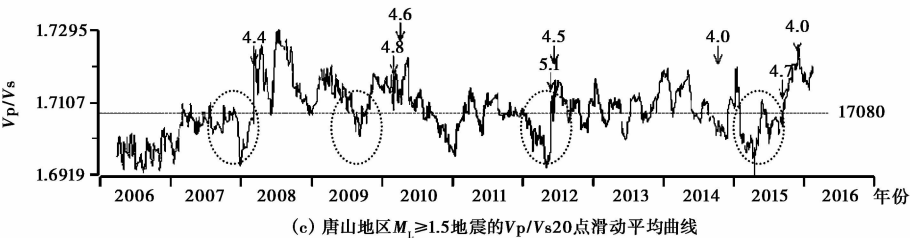
1976年唐山发生7.8级地震,1995年以后无5级以上地震,目前唐山老震区的余震处于晚期(王想等,2012),自2006年以来该区4级以上地震呈现两年准周期的活动韵律。图3(a)为唐山地区波速比数据的原始曲线,无明显变化。滑动平均是对动态观测数据序列进行平滑处理的一种十分重要的方法(赵娟等,2005),既可得出较平滑的测量结果,也可滤掉频繁的随机误差。用不同窗口对波速比数据作滑动平均,若窗口太大则可能滤掉太多有效信息,若窗口太小则得不到较为平滑的结果,通过多次实验最终确定对 $M_L \geq 1.0$ 的地震的波速比用30点滑动平均(图3(b)),对 $M_L \geq 1.5$ 的地震波速比用20点滑动平均(图3(c)),对 $M_L \geq 2.0$ 的地震波速比用10点滑动平均(图3(d))。



(a) 唐山地区 V_p/V_s 原始曲线



(b) 唐山地区 $M_L \geq 1.0$ 地震的 V_p/V_s 30点滑动平均曲线



(c) 唐山地区 $M_L \geq 1.5$ 地震的 V_p/V_s 20点滑动平均曲线



(d) 唐山地区 $M_L \geq 2.0$ 地震的 V_p/V_s 10点滑动平均曲线

图3 唐山地区不同震级的波速比时序曲线

冯德益(1981)提出波速比异常变化的全过程:地震波速比一般先下降然后回升,当再次达到或略超过初始值后就发生主震,震后还有一个不稳定的变化期。一系列的震例研究(刘继禄等,2000;王林瑛等,2008、2011、2014;龙海英等,2011)也表明震前震源区附近波速比出现类似变化过程。按照这个异常判定标准对唐山地区不同震级波速比滑动曲线进行定性讨论,可以发现在唐山地区 $M_L 4.0$ 以上地震发生前该区的波速比大都出现了下降-低值-恢复的变化过程。2008年3月11日河北卢龙发生 $M_L 4.4$ 地震,该区 $M_L \geq 1.0$ 、 $M \geq 1.5$ 、 $M \geq 2.0$ 地震波速比滑动曲线在地震前均出现明显的下降-低值-恢复变化形态,持续时间半年左右,最终在低值回升阶段发震;2010年3月6日该区发生滦县 $M_L 4.8$ 以及4月9日丰南 $M_L 4.6$ 地震,其 $M_L \geq 1.0$ 、 $M_L \geq 2.0$ 地震波速比滑动曲线在地震前没有出现明显低值异常,但 $M_L \geq 1.5$ 地震波速比滑动曲线在震前一年出现下降-低值变化,恢复一段时间后发生上述地震;2012年5月28日该区发生唐山 $M_L 5.1$ 及6月18日宝坻 $M_L 4.5$ 地震, $M_L \geq 1.0$ 、 $M \geq 1.5$ 、 $M \geq 2.0$ 地震波速比滑动曲线在震前均出现下降-低值变化,尤其是 $M_L \geq 1.5$ 和 $M_L \geq 2.0$ 地震波速比滑动曲线低值异常明显,地震发生后低值恢复;2014年10月14日该区发生滦县 $M_L 4.0$ 地震,其 $M_L \geq 1.0$ 及 $M_L \geq 2.0$ 地震波速比滑动曲线没有出现明显的波速比异常,但是 $M_L \geq 1.5$ 地震波速比滑动曲线表现出明显下降,在低值持续的过程中发生该次地震,随后波速比滑动曲线恢复到均值线附近;2015年9月14日该区发生昌黎 $M_L 4.7$ 以及11月28日丰南 $M_L 4.0$ 地震,其 $M_L \geq 1.0$ 、 $M \geq 1.5$ 、 $M \geq 2.0$ 地震波速比滑动曲线在地震发生半年前均出现下降-低值-恢复变化。从对波速比滑动曲线的定性分析可见唐山地区自2006年以来的几次中等地震发生前波速比滑动曲线的确存在一定的异常形态,尤其是 $M_L \geq 1.5$ 地震波速比滑动曲线在这些中等地震发生前变化明显。

上面对不同震级档的地震波速比滑动平均曲线与唐山地区 $M_L 4.0$ 地震的关系进行了定性讨论,下文尝试对其进行定量分析。由于该区 $M_L \geq 1.5$ 地震波速比与中强地震对应关系较好,因此着重讨论 $M_L \geq 1.5$ 地震波速比异常的预报效能。选取唐山地区的波速比平均值 1.708 作为标准,波速比滑动曲线异常判定指标为:①异常从波速比均值附近开始下降;②异常持续时间超过 3 个月;③异常下降幅度超过 0.010;④异常回升到均值线附近结束。由于唐山地区不同震级的滑动均值曲线在 2006~2007 年都处于较低水平,该低值可能与 2006 年 7 月 4 日河北文安 5.1 地震有关,因为没有 2006 年之前的波速比数据无法得出该次低值的持续时间,因此在统计定量异常时不予统计。按照以上限定条件统计唐山地区 $M_L \geq 1.5$ 的地震波速比滑动均值共出现 4 次异常(表 1),异常持续时间大多在 3~6 个月,其中有 3 次异常出现后发生 $M_L 4.0$ 以上地震,没有发现波速比持续时间及异常幅度与地震大小明显相关,有 2 次地震发生在在波速比呈低值期间,有一次地震在异常结束后 4 个月发生,对应率为 75%,结果是置信水平为 97.5%的预报效能 R (许绍燮,1989)为 0.55,总之该区波速比滑动曲线对中等以上地震有一定反映能力。

3.2 其他分区的波速比变化特征

下面按照对唐山地区波速比的分析思路对河北地区的其他 3 个分区进行研究,略去对各个分区不同震级波速比异常的定性研究,结合每个分区的特点重点分析 $M_L \geq 1.5$ 地震的波速比曲线异常特征,尝试得出可用于河北地区及相邻区域的波速比异常判定标准。

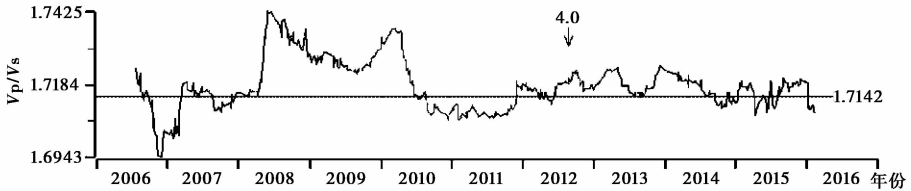
3.2.1 京津地区的波速比变化特征

该区位于北京拗陷与大兴隆起间,曾发生 1679 年三河-平谷 8 级大震,最近的地震为

表 1 唐山地区波速比异常统计

序号	开始日期 (年-月-日)	结束日期 (年-月-日)	持续时间/月	下降幅度	间隔时间/月	对应的地震
1	2007-12-12	2008-03-11	3	0.0137	0	2008-03-11 卢龙 M_L 4.4
2	2010-09-22	2011-03-07	6	0.0113	无	无
3	2012-01-12	2012-05-28	4	0.0132	0	2012-05-28 唐山 M_L 5.1
4	2015-02-03	2015-05-24	3	0.0161	4	2015-09-14 卢龙 M_L 4.7

2006年7月4日文安5.1级地震,王林瑛等(2008)通过对首都圈波速比研究得出文安地震前附近地区波速比有异常反应,2006年该区的波速比滑动平均值明显偏低(图4),由于缺少对文安地震前的较长时间段的波速比跟踪分析,因此对2006年的低值异常不予统计。按照唐山地区波速比异常的判定标准,自2006年至今北京地区的波速比无明显异常。2012年8月26日的天津宝坻 M_L 4.0地震属于2012年6月18日天津市宝坻区与河北省玉田县交界 M_L 4.5地震的余震活动,该地震位于京津地区边缘,属唐山大地震的晚期余震活动。由于波速比滑动均值来自京津地区地震的震相数据,但其孕震区可能不在京津而在唐山地区(图3(c)),所以京津地区的波速比未出现明显异常。

图 4 京津地区 $M_L \geq 1.5$ 地震的 V_p/V_s 20 点滑动平均曲线

3.2.2 晋冀蒙地区波速比的变化特征

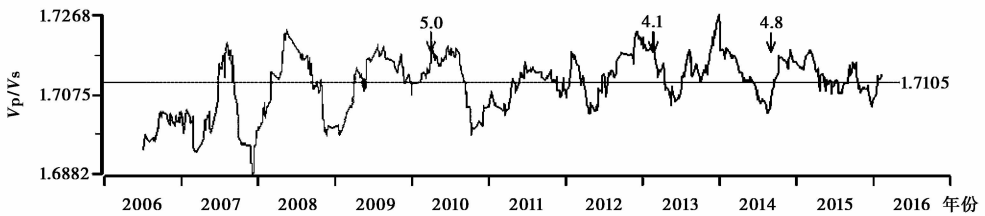
该区位于山西地震带与张渤地震带的交汇部位,构造复杂,1998年1月10日张北6.2级地震前京西北地区出现明显低值异常(刘继禄,2000)。定性看该区 $M_L \geq 1.5$ 地震波速比滑动曲线在2015年9月6日涿鹿地震前出现下降-低值-回升的异常形态。若进行定量分析(表2),则可看出有3次异常,未对应中等地震;但是从表2也可看出山西大同地震及河北涿鹿地震发生前该区均出现3个月左右的波速比低值异常,下降幅度分别为0.0777和0.0078,只是未达到异常判定标准的0.01故未被判定为异常,这说明依唐山地区的地震资料统计出来的异常定量标准(前文所述的①、②和④)是适用的,而并不适用于晋冀蒙地区(③),若把异常判定标准的“③异常下降幅度超过0.010”中的下降幅度适当的降低到0.007,则该区波速比的对应率为0.4,预报效能 R 为0.15。

3.2.3 河北省南部地震的波速比变化特征

河北省南部地区自2006年以来中等地震活动均集中在河南范县,在这几次地震发生前该区 $M_L \geq 1.5$ 地震波速比滑动均值曲线从形态上均表现出下降-低值的异常。若进行定量分析(表3),则可看出有1次异常,其后半年内无 M_L 4.0以上地震。但从表3也可看出在2010年、2014年、2015年该区均出现了持续4~5个月波速比低值,其低值的最大降幅在

表2 晋冀蒙地区波速比异常统计

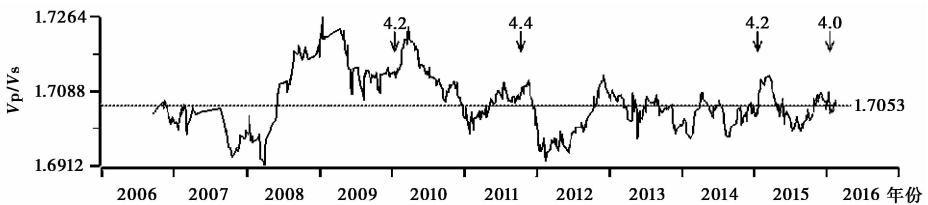
序号	开始日期 (年-月-日)	结束日期 (年-月-日)	持续时间/月	下降幅度	间隔时间/月	对应的地震
1	2007-09-12	2008-03-05	5	0.0184	无	无
2	2008-11-03	2009-04-02	6	0.0131	无	无
3	2010-09-11	2011-04-16	7	0.0115	无	无
4	2012-03-28	2012-06-20	3	0.0077	6	2013-02-12 大同 M_L 4.1
5	2014-06-22	2014-09-18	3	0.0078	0	2014-09-06 涿鹿 M_L 4.8

图5 晋冀蒙地区 $M_L \geq 1.5$ 地震的 V_p/V_s 20点滑动平均曲线

0.006~0.007之间,在低值结束后2~5个月的时间内河南范县发生 M_L 4以上地震。因此若把异常定量标准的下降幅度设定为0.006,则该区的地震对应率将大大提高,地震对应率为0.6, R 值为0.35。

表3 河北南部地区波速比异常统计

序号	开始日期 (年-月-日)	结束日期 (年-月-日)	持续时间/月	下降幅度	间隔时间/月	对应的地震
1	2010-12-27	2011-05-06	5	0.0066	5	2011-10-13 范县 M_L 4.4
2	2011-12-21	2012-10-17	10	0.0131	无	无
3	2013-11-20	2014-04-08	4	0.0076	无	无
4	2014-07-15	2014-11-28	4	0.0071	2	2015-01-18 范县 M_L 4.2
5	2015-06-01	2015-11-02	5	0.0061	2	2016-01-20 范县 M_L 4.0

图6 河北南部地区 $M_L \geq 1.5$ 地震的 V_p/V_s 20点滑动平均曲线

4 结论

本文通过和达法计算唐山地区的波速比数据,用不同窗长滑动得到不同震级的波速比时序动态演化曲线。减小了随机误差,得到较为平滑的结果,但是窗口的选择至关重要,若

窗口太大则会过滤掉很多的有效信息,对细节的反映有所欠缺;若窗口过小,虽然对动态变化的细节反映更加灵敏,但是对趋势表征不明显。通过对地震前不同震级档波速比曲线的形态特征进行分析,发现在大部分中等地震发生前唐山地区的波速比表现出下降-低值的异常形态,其中 $M_L \geq 1.5$ 地震波速比滑动曲线在地震前其异常形态表现的更为明显。通过对唐山地区的 $M_L \geq 1.5$ 地震的波速比曲线与中等地震关系的定性讨论,提出了该区波速比异常判定的4个定量标准,即:①波速比异常是波速比自其均值线附近开始下降;②异常持续时间超过3个月;③异常下降幅度超过0.010;④异常回升到均值线附近结束。这4个标准中的①和②为异常的开始和持续时间,③为异常下降幅度标准,④提供了异常结束的判定方法。通过分析可知对应地震多在异常持续期间或者异常结束半年内发生,其对应率为75%, R 值为0.55,这表明唐山地区的波速比异常是有一定信度的中短期指标。在把唐山地区波速比异常定量标准应用于河北省的其他3个分区的时候,异常标准的①、②和④能够起到很好的约束作用,而③即异常下降幅度却各有差别。和达法计算波速比是基于地壳中上层均匀单层模型,其不确定性主要是由介质的横向不均匀性的局限产生的,本文的研究结果为特定区域限定条件内的波速比滑动平均的结果,忽略了更小范围的局部区域介质的各向异性;同时不同研究区域地质构造以及地震活动性不同,地震活动频繁的区域其波速比数据多,其滑动曲线能够实时的、更加真实的反映该区波速比的变化特征,相反地震活动较弱则波速比数据少,其滑动曲线则不能实时的反映该区的波速比变化特征。

致谢 本文使用中国地震局地球物理研究所李艳娥老师提供的计算程序,在此表示衷心感谢。衷心感谢审稿老师提出的中肯意见。

参考文献

- 蔡静观,2000,波速比计算中的不确定因素和在地震预报中的应用,地震研究,23(1),51~56。
- 刁桂苓、周仕勇等,2005,岫岩地震序列的平静波速比前兆异常,华北地震科学,23(4),1~5。
- 冯德益,1981,地震波速异常,7~19,北京:地震出版社。
- 黎明晓、刘杰,2006,云南地区地震序列的波速比(V_p/V_s)异常的研究,26(1),26~34。
- 李善邦,1981,中国地震,北京:地震出版社:522~532。
- 刘继禄、张从珍等,2000,张北6.2级地震前京西北地区地震波速比的异常变化,地震地磁观测与研究,21(1),7~11。
- 龙海英、聂晓红、唐兰兰,2011,新疆乌苏5.1级地震前波速比异常震例研究,地震研究,34(2),126~130。
- 王林瑛、李艳娥、李芳等,2011,汶川地震前后地震波速比和视速度变化特征的研究,地震学报,33(1),1~14。
- 王林瑛、李艳娥、郑需要等,2014,芦山 M_s 7.0强震前单台波速比变化特征研究,地震学报,36(1),42~58。
- 王林瑛、郭永霞等,2008,汶川地震前后首都圈分区波速比时变特征,地震学报,30(3),240~253。
- 王想、冯向东等,2012,唐山老震区地震活动特征,地震地磁观测与研究,33(5/6),44~48。
- 许绍燮,1989,地震预报能力评分,见:许绍燮、陆远忠、朱传镇等,地震预报方法实用化研究文集(地震学专辑),586~590,北京:学术书刊出版社。
- 赵娟、韩延本,2005,滑动平均情形下的相关显著水平估计,北京师范大学学报(自然科学版),41(2),139~141。
- Nur A,1972,Dilatancy,pore fluids and premonitory variations of ts/tp travel times. Bull Seism Soc Amer,62(5),1217~1222。
- Nakamura A,Hasegawa A,Hirata N,Iwasaki T,Hamaguchi H. 2002. Temporal variations of seismic wave velocity associated with 1998 M6.1 shizuikuishi earthquake. Pure Appl Geophys,159,1183~1204。
- Korneev V A,McEvelly T V,Karageorgi E D. 2000. Seismological studies at Parkfield. VIII: modeling the observed travel-time changes, Bull Seismol Soc Amer,90,702~708。
- Schaff D P,Beroza G C. 2004. Coseismic and postseismic velocity changes measured by repeating earthquakes. J Geophys Res,109,

B10302, doi:10.1029/2004JB003011.

Kanamori H, Fuis G, 1976, Variation of P wave velocity before and after the Galway Lake earthquake ($M_L = 5.2$) and Goat Mountain earthquake ($M_L = 4.7$), in the Mojave desert, California, Bull Seism Soc Amer, **66**, 2027~2037.

McEvelly T V, Johnson L R, 1974, Stability of P and S velocities from central California quarry blasts, Bull Seism Soc Amer, **64**, 343~353.

Mogi k, 1985, Earthquake Prediction, Tokyo: Academic Press, 1~25.

Semenov A N, 1969, Variations of the travel time of transverse and longitudinal waves before violent earthquakes, Izv Acad Sci, USSR, Phys Solid Earth, **3**, 245~258.

The average wave velocity ratio analysis of the characteristics in Hebei Province and its adjacent areas

Wang Yaru Wang Xiang Gong Meng Guo Lei Liu Xiaodan

Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

Abstract In this article we use the earthquake data in Hebei Province and its adjacent area to calculate the average wave velocity ratio, and scan the results with different window size and length. By analyzing the characteristics of the curve in different regions, we can find that there is a better corresponding relation between the curve of $M_L 1.5$ and moderate earthquake. So, we extract the abnormal index to calculate the prediction efficiency for the four areas.

Key words: Wave velocity ratio; Abnormal reaction; Moderate earthquake; Prediction efficiency