

岳晓媛、武安绪、冯刚等,2015,首都圈中强震前波速比时空演化特征研究,中国地震,31(4),688~697。

首都圈中强震前波速比时空演化特征研究

岳晓媛¹⁾ 武安绪¹⁾ 冯刚¹⁾ 武敏捷¹⁾ 李红¹⁾ 李腊月²⁾

1)北京市地震局,北京市海淀区苏州街 28 号 100080

2)中国地震局第一监测中心,天津 300180

摘要 选用首都圈测震台网观测报告,采用多台和达法计算首都圈地区 2002~2014 年小震波速比值,系统分析首都圈地区 2002 年以来中强地震前波速比的时空变化特征,探讨中强震孕震过程的前兆信息。为了保证多台波速比计算结果的精度及可靠性,对其计算条件进行了合理限制。计算结果表明,首都圈中强地震发生前,出现了多次波速比低值异常,在震源区附近存在显著的波速比低值异常区,发震地点多为异常区的边缘。

关键词: 波速比 多台和达法 时空演化 低值异常 首都圈地区

[文章编号] 1001-4683(2015)04-0688-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

在中强地震的孕育过程中,震源区及其附近的介质会发生如微破裂、扩容、塑性硬化及相变等变化,通过该区域的地震波速相应也会发生变化。因此,研究波速异常的变化可以得到震源区介质物理状态改变的信息,即震前的前兆信息,这也是波速异常用来作为地震预测方法的物理基础。国内外地震学者据此开展了大量的研究工作并总结了很多较好的震例。日本地震学家和达清夫于 1928 年提出和达法(李善邦,1981)用来计算从震源地到地表台站的介质波速的比值。随后,国外地震学者陆续开展对地震波速的研究工作,Aggarwal 等(1975)观测到了美国纽约兰山湖地区震前波速比异常。Nur(1972)、Scholz 等(1973)相继提出膨胀扩容模式解释较大地震前后波速比变化的异常机理。我国学者的波速比研究工作始于 20 世纪 70 年代,至今也已取得了大量的研究成果。冯德益(1981)较系统地研究了我国西部部分强震、中强震前的波速比变化特征。姜秀娥等(1981)利用四震相法讨论了唐山大地震的波速异常特征。

近年来,随着测震观测仪器的改进和台站布局密度的提高以及震相资料的不断积累和观测精度的提升,有关利用数字地震资料分析中强地震前后波速变化特征的研究逐渐增多(Nakamura et al,2002)。蔡静观等(1999)对丽江、宁蒗强震波速比时空演化过程进行了系统分析。周焕鹏(1994)、黎明晓等(2004)和韩晓明等(2010)分别对南黄海、华北和包头等地区进行了平均波速比的研究。光春云等(1994)、李永莉等(2009)、岳晓媛等(2008)、龙海

[收稿日期] 2015-05-22; [修订日期] 2015-07-14

[项目类别] 北京市地震局科技项目青年专项资助

[作者简介] 岳晓媛,女,1981 年生,工程师,主要从事数字地震学及地震预测等研究工作。E-mail:yxy@bjseis.gov.cn

英等(2011)分别对山西、滇西、北京和新疆等地区显著地震前后波速比的变化特征进行了研究。蔡静观等(1996)利用3个地震台单台波速比的动态变化对澜沧-耿马大震前的波速比异常进行了时空变化特征研究。李艳娥等(2014)采用单台多震和达法对汶川 $M_s 8.0$ 地震前波速比的时空变化特征进行了分析。

目前,将波速比方法应用于首都圈地区的研究较少,一般多为背景性分析,如地震波速度结构分析。而首都圈地区是华北重要的地震活动区,地震活动频繁且分布广泛,历史上曾发生过多强震。因此,本文采用和达法,利用首都圈地区高精度、高密度的数字地震资料,基于多台和多震联合测定波速比,系统分析首都圈地区中强震前波速比的背景趋势和异常变化特征,以期为该地区地震危险性分析提供依据。

1 原理

日本地震学家和达清夫于1928年提出求波速比的和达法。其基本原理为对1个地震以1组台站记录的纵波到时 T_{P_i} 、纵横波到时差 $T_{(S-P)_i}$ 的资料作图,拟合散点求得直线斜率,再加1即为波速比。

假设所选研究区域为理想的均匀弹性介质,以多台记录到的近震直达P、S波到时 t_{P_i} 和 t_{S_i} 计算波速比 $v_p/v_s(r)$ 、相关系数 R 和波速比的计算误差 γ 。计算公式如下

$$\frac{v_p}{v_s} = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Delta t_i \right)^2}{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i t_{P_i} - \sum_{i=1}^n t_{P_i} \sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, n 为台站个数; $\Delta t_i = t_{S_i} - t_{P_i}$, t_{P_i} 为P波到时, t_{S_i} 为S波到时。相关系数 R 为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{P_i} - \bar{t}_p) \cdot (\Delta t_i - \Delta \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{P_i} - \bar{t}_p)^2 \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \Delta \bar{t}_i)^2}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

波速比计算误差 γ 为

$$\gamma = \left(\frac{v_p}{v_s} - 1 \right)^2 \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (\delta t'_{P_i})^2}{(n-2) \left[n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Delta t_i \right)^2 \right]}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中, v_p/v_s 为波速比, $\delta t'_{P_i} = (t_{P_i} - t_0) - \Delta t_i / (v_p/v_s - 1)$ 。

2 研究区域、数据筛选及计算处理

2.1 研究区域

选取首都圈地区 ($38.5^\circ \sim 41.0^\circ N$, $113.0^\circ \sim 120.0^\circ E$) 为研究区域。2002~2014年首都圈地区共发生4次 $M_L \geq 5.0$ 地震,分别为2004年1月20日滦县 $M_L 5.0$ 、2006年7月6日文安 $M_L 5.5$ 、2010年4月4日大同 $M_L 5.0$ 和2012年5月28日唐山 $M_L 5.1$ 地震。本文以这4次地震作为研究对象,采用多台/多震和达法,利用首都圈地区的数字地震资料,从时间进程和空

间分布 2 个方面分析震前地震波速比的时空演化和异常特征。

图 1 为首都圈地区 2002~2014 年 4 次 $M_L \geq 5.0$ 地震及地震台站分布。由图 1 可见,首都圈地区地震台站数量多且分布密集,积累了丰富的、连续的和高精度的数字化地震波形资料,为我们开展该地区波速比异常研究工作提供了便利条件。

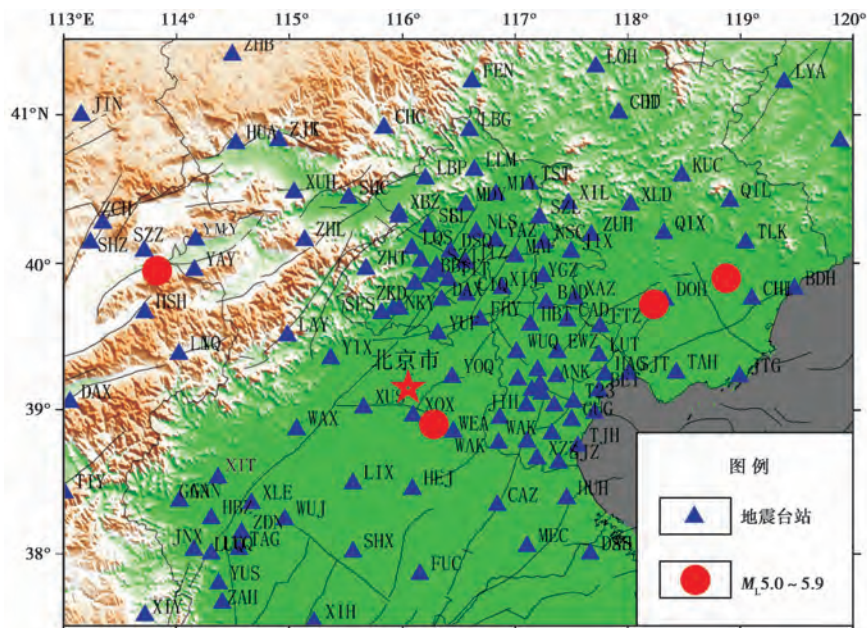


图 1 2002~2014 年首都圈地区 $M_L \geq 5.0$ 地震及台站分布

2.2 数据筛选及信度分析

本文利用 2002~2014 年首都圈地区数字地震台网记录的 $M_L \geq 1.0$ 小震震相报告,读取 11000 次地震的直达 P 波、S 波震相数据,计算该地区的地震波速比。同时,为了提高计算精度及计算结果的可靠性,对参与计算的震相数据给出合理限制。具体限制条件为:①因计算结果的误差与台站数目的多少密切相关(张学民等,2007),故对 1 次地震事件参与计算的台站数量要求有 6 个以上;②鉴于首都圈地区台站分布比较密集,设定 S 波、P 波到时差的范围为 0~20s;③计算的相关系数 $R \geq 0.97$;④计算误差 $\gamma \leq 0.05$ 。

图 2 为参与波速比计算的数据信度分析图。其中,图 2(a)为波速比均值与对应地震次数统计图,从中可见,波速比均值高度集中于 1.71 附近,且数值为 1.67~1.75 的占 97%;图 2(b)为计算波速比均值的相关系数与对应地震次数的统计图,全部波速比的相关系数 $R > 0.97$ 的比例达 98%;图 2(c)为参与计算波速比的地震震级和波速比值关系图,显示波速比值与震级之间的线性关系不明显,即波速比值不受震级大小的影响;图 2(d)为计算误差统计图,其中 $\gamma \leq 0.05$ 的占 91%。通过以上对拟合数据的限制,既提高了波速比计算结果的实际精度,又保证了本文以下计算与分析结果的可靠性。

2.3 波速比背景趋势的计算结果

基于以上波速比公式、初动数据及限制条件,首先得到了首都圈地区波速比背景趋势计

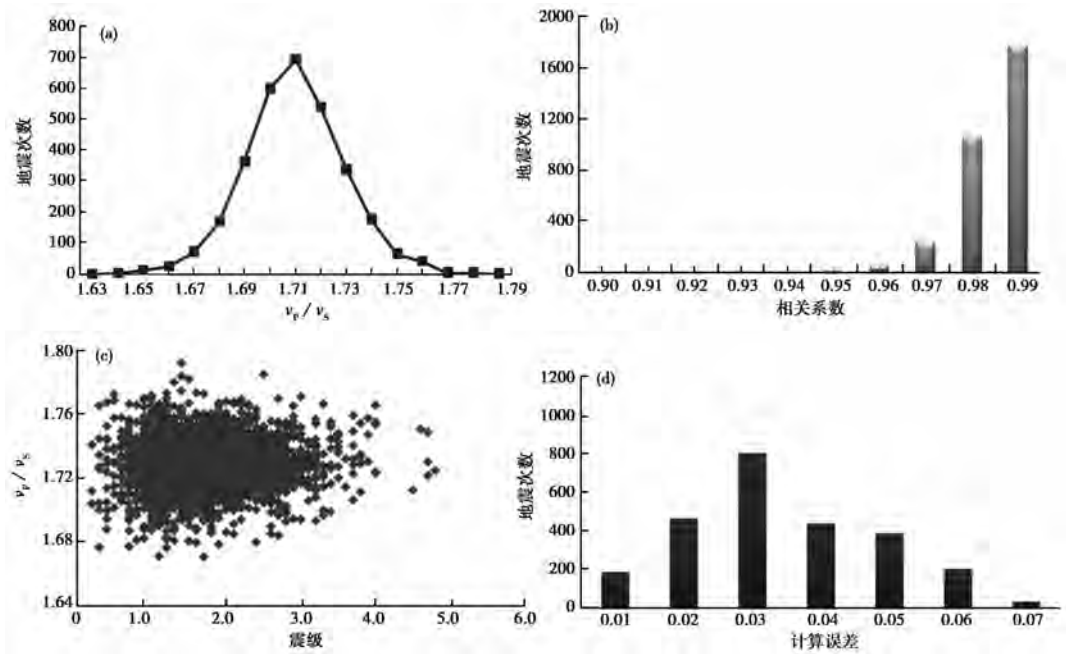


图 2 计算数据信度分析

(a) 波速比值与对应的地震次数分布; (b) 相关系数与地震次数统计;
(c) 波速比值与震级关系; (d) 计算误差与地震次数统计

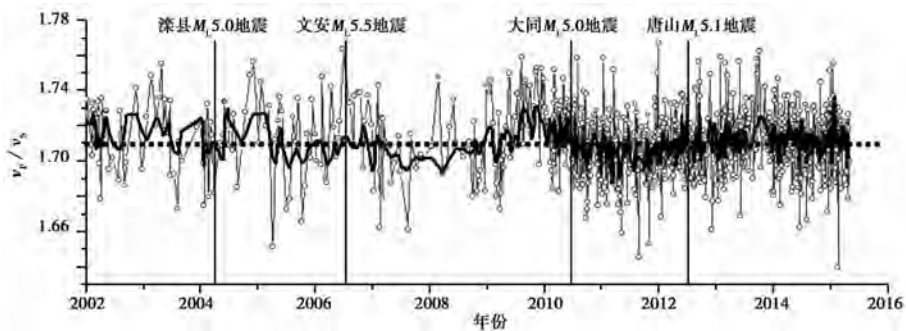


图 3 2002~2014 年首都圈地区波速比背景分析时序图

灰色:波速比原始曲线;黑色:波速比平滑曲线;黑色虚线:异常阈值

算结果(图 3)。由图 3 可见,2002~2014 年首都圈地区波速比均值为 1.71,该结果与黎明晓等(2004)、赵明淳等(2005)的结果比较接近,均略低于线弹性体的波速比值 1.73。因此,以下进行震例时空分析时,将波速比均值 1.71 作为异常分析阈值,即当波速比值小于 1.71 时即作为低值异常。

3 首都圈地区典型震例的波速比异常分析

3.1 波速比的时序演化分析

为更加清晰地分析地震波速比时序曲线的整体变化趋势,依据本文最终参与计算的样本多少综合设定,选取 10 点滑动曲线进行震例分析(图 4):

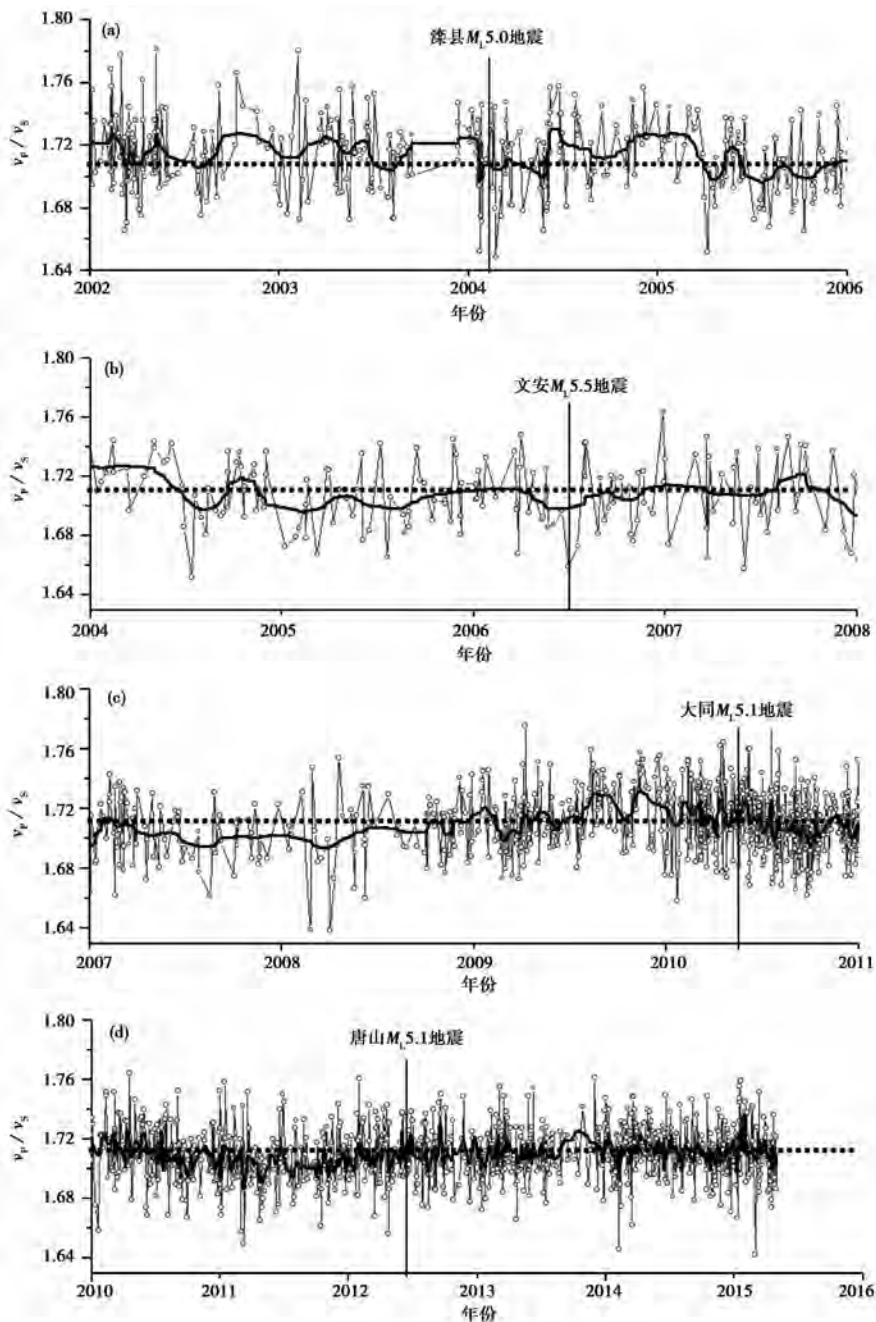


图4 2002~2014年首都圈地区4次中强震波速比趋势时序图
细实线:波速比原始曲线;粗实线:波速比平滑曲线;虚线:异常阈值

(1)2004年1月20日滦县 M_L 5.0地震。图4(a)显示滦县地震前首都圈地区地震波速比在均值上下波动,变化平稳,时间进程上没有出现波速比低值异常现象。

(2)2006年7月6日文安 M_L 5.5地震。从图4(b)可以看出,2004年11月首都圈地区

波速比出现显著的低值异常,2005年6月异常变化出现转折开始回升,2005年12月波速比恢复至正常值,7个月后发生了文安地震,整个低值异常过程持续1年多,异常演化模式为异常-恢复-正常-发震。

(3)2010年4月4日大同 M_L 5.0地震。自文安 M_L 5.5地震后,首都圈地区波速比值在均值附近波动,在维持了短暂的正常水平后于2007年2月再次出现波速比低值异常,2008年3月异常开始恢复,2008年11月首都圈波速比恢复到正常水平,1年半后发生大同地震,此次异常过程持续时间近2年(图4(c))。大同地震的异常演化模式为异常-恢复-正常-发震。

(4)2012年5月28日唐山 M_L 5.1地震。图4(d)显示,2010年6月首都圈地区波速比开始下降,出现低值异常,于2011年3月异常达到最低点,随后开始恢复,于2012年1月波速比恢复至正常水平,4个月后发生了唐山地震,整个低值异常过程持续时间长达1年半。唐山地震的波速异常演化模式为异常-恢复-正常-发震。

时序扫描显示,4次震例中只有滦县地震前未出现波速比低值异常,其余3次震例震前均出现了波速比低值异常,并有显著的低值异常持续过程,低值异常持续时间为1.5~2.0年,波速比异常演化模式为异常-恢复-正常-发震。

由于不同地区的介质物性可能存在横向差异,使用多台和达法时可能会导致计算结果发生相应变化,因此,本文将以4次震例为中心,分别设定各自的研究区域,对比分析震前波速比的时间变化特征(图5)。为保证充分的地震样本数参与计算,选取震中周边的地震集中区为研究区域,分别为唐山老震区($39.0^\circ \sim 40.5^\circ N, 117.5^\circ \sim 119.5^\circ E$)、文安地区($38.5^\circ \sim 39.9^\circ N, 115.0^\circ \sim 117.5^\circ E$)、大同地区($39^\circ \sim 41^\circ N, 112^\circ \sim 115^\circ E$)。

图5(a)为唐山老震区波速比时序图。由图5(a)可见,唐山地震前该区共出现波速比低值异常1次,异常时间范围为2005~2009年6月,2012年5月发生唐山地震,此次异常持续时间为4年半,异常演化模式为异常-恢复-正常-发震;对比图4(a)、4(d)发现,滦县地震前首都圈地区和唐山老震区均未出现波速比异常,而唐山地震前2个区域在时序上均显示出波速比低值异常,唐山老震区的异常持续时间相对更长;2015年该区波速比开始下降并处于较低值水平,目前尚无转折回升趋势出现。图5(b)为文安地区波速比时序图。该区地震波速比于2005年2月开始下降并出现低值异常,在恢复过程中发生文安地震,地震发生后波速比很快恢复至正常值水平,异常演化模式为异常-恢复-发震-正常,至今该区波速比变化比较平稳,未出现显著的低值异常;对比图4(c)发现,文安地区波速比低值异常幅度更大、更为突出。图5(c)为大同地区波速比时序图。2006年3月该区波速比开始下降并出现低值异常,异常持续至2008年10月结束,2010年4月发生大同地震,异常演化模式为异常-恢复-正常-发震,地震发生后该区波速比变化一直较为平稳;对比图4(d)发现,大同地震前首都圈地区、大同地区波速比时序曲线均记录到波速比低值异常。

综合对比首都圈地区(图4)和震中区附近(图5)波速比时序曲线可见,滦县地震前2个研究区域均未出现波速比低值异常,其他3次震例在时序图上均显示存在低值异常;3次震例前的波速比异常持续时间均以年为单位,持续时间较长,演化模式大致相同,异常幅度以图5更为显著,这可能由于选取震中附近地震相对集中范围的地震进行分析,避免了大范围研究区域的平均结果忽略小范围区域的波速异常,可以得到震源区附近的地震波速比能够看到更为显著的波速比异常过程。

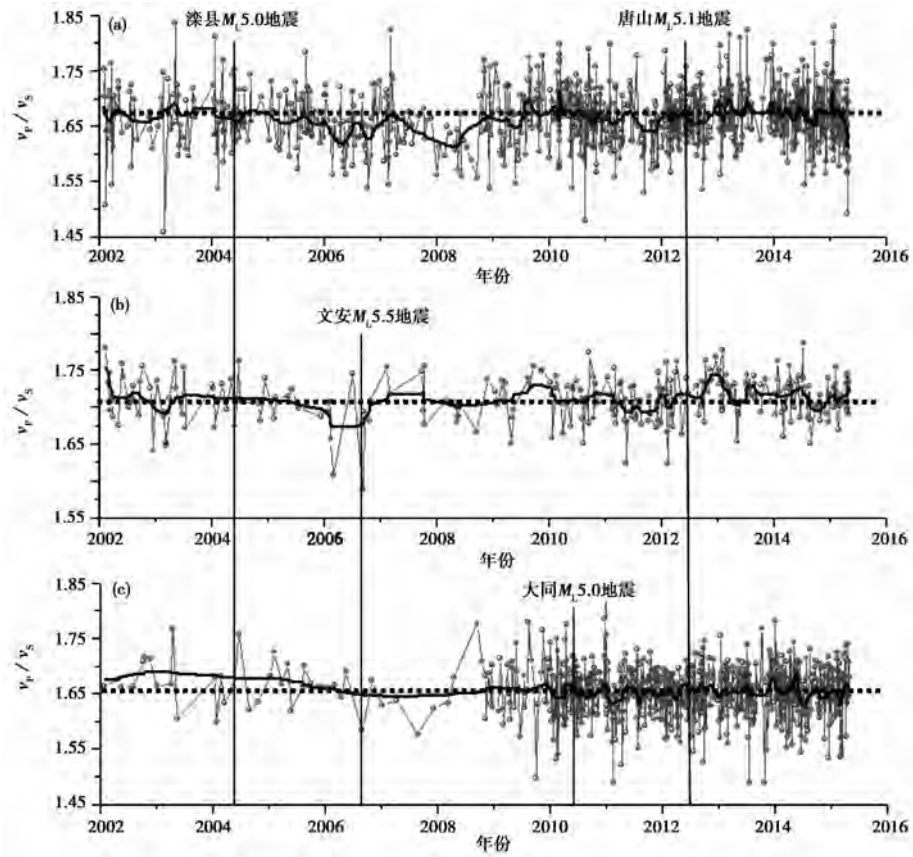


图5 4次地震前周边区域地震波速比时序曲线

细实线:波速比原始曲线;粗实线:波速比平滑曲线;虚线:异常阈值

3.2 波速比空间演化特征分析

图6为首都圈地区2002~2014年4次中强震例前波速比空间扫描图。从波速比空间分布图分析波速比异常区域,可以判定未来地震的震中范围。从图6可以看出:

(1)滦县地震。在滦县地震前,首都圈地区波速比低值异常区集中在首都圈东北部,滦县地震发生在该异常区的西南端,空间分布显示滦县地震前,在震源区附近出现了异常区。

(2)文安地震。自2005年3月首都圈地区出现为期近1年半的波速比低值异常,异常区主要分布在京西北和首都圈中南部,其中以首都圈中南部异常区最为突出且异常范围较大,文安地震即发生在该异常区内。

(3)大同地震。从时序扫描图来看,大同地震的波速比异常时间范围为2007年2月~2009年3月,在该异常时间段内首都圈西部出现了NW向和NE向2个较大范围波速比低值异常区,2个异常区交汇于山西带北端,大同地震即发生于该交汇处。

(4)唐山地震。2010年6月,首都圈地区出现为期近2年的波速比低值异常,从对应的空间扫描图来看,波速比低值异常区主要分布在环渤海湾,而唐山地震即发生在异常区的北西端。

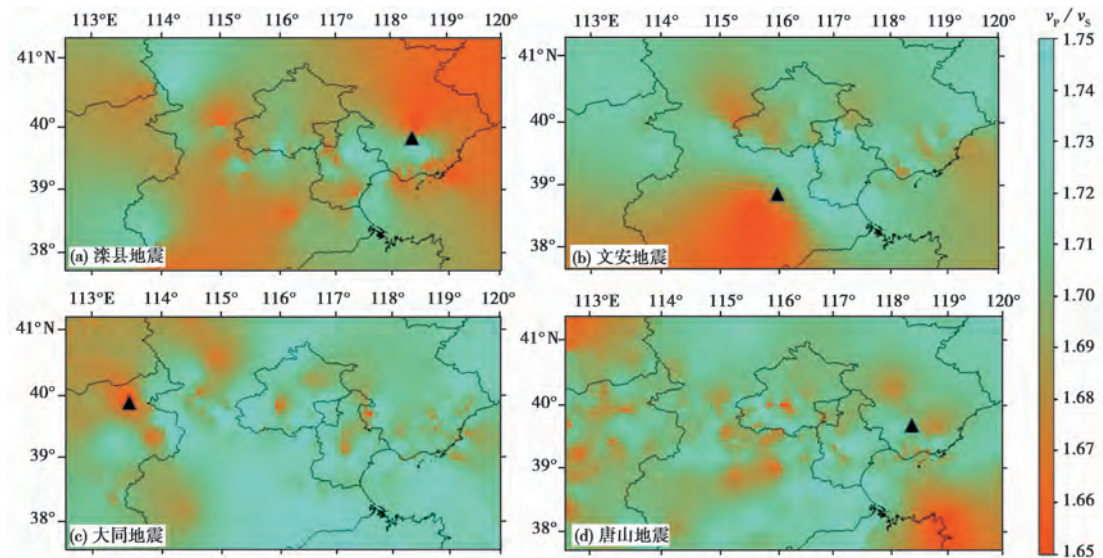


图 6 首都圈 4 次震例震前波速比空间等值线图

黑色三角形为震中

图 6 为首都圈 4 次震例震前波速比空间等值线图。图 6 显示, 4 次震例震前在震源区附近均出现了波速比低值异常区, 其中只有文安地震发生在异常区内, 其余 3 次地震均发生在异常区附近或边缘地区, 这可能与地壳介质分布不均匀有关。地壳应力的不断积累会导致构造破裂, 因而地下局部介质的密度变化在空间上会存在一定的差异。

4 结论与讨论

本文以首都圈地区 2002 年以来发生的 4 次中强以上地震为研究对象, 采用多台和达法研究了震前地震波速比的背景趋势和时空异常动态演化特征。为了保证计算结果的精度和可靠性, 对参与计算的地震数据在相关系数、台站、误差等方面给予了限定, 如计算误差控制在 0.05 以内, 相关系数达 0.97 以上等。通过以上计算结果分析得到如下结论:

(1) 4 次震例中只有滦县地震在震前未出现波速比低值异常, 其余 3 次震例在时序方面均出现低值异常, 一般当异常达到低点后出现转折回升后发震, 异常持续时间为 1.5~2.0 年; 如只出现单点低值异常突跳并未形成持续的异常过程, 那么该异常的信度不大, 此结果与王林瑛等 (2008) 的结论基本一致。

(2) 滦县、大同和唐山等 3 次震例的波速比低值异常演化模式均表现为异常-恢复-正常-发震, 本文得到的演化模式与前人的研究结果 (龙海英等 (2011)) 也较为一致。对于异常演化模式的解释一般有 2 种: 一是冯德益 (1981) 的认为在岩石受压初期, 波速随压力的增加而增大, 但在岩石破裂前, 当压力超过岩石强度的 50% 左右以后, 波速则随压力的增加而明显下降。二是 Nur (1972) 的开裂膨胀模式: 在波速异常阶段, 当应力积累到岩石最大强度一半之后, 微裂陆续发生; 由于膨胀效应的作用, 波速开始下降, 到了最低点后延续一段时间, 此时期成为地震安全期。这是因为膨胀减少孔压力, 实际上增加了岩石的有效破坏强度, 使地震不能发动, 待外来地下水渗入, 水肿作用提高孔压力后, 岩石弹性模量增大, 波速才又回

升。由于水的渗流很慢,因此需要一定时间才能恢复波速正常,达到发震阶段(李善邦,1981)。本文的计算结果分析表明基本符合以上2种波速比异常机理的解释。

(3)4次地震的波速比空间图像显示,当区域内出现波速比低值异常区时,未来地震多发生在异常区附近以及边缘与异常区交汇处。

除此之外,为了避免由于不同地区的介质物性可能存在横向差异而导致计算结果发生变化,本文还分析了4次地震前震中附近区域波速比的时序变化。经对比发现,2个研究区域的震前波速比异常幅度以震中附近区域更为显著,这可能与选取的地震均较为集中,减小了地震波传播路径的差异,因而能够看到更为显著的波速比异常过程有关。

综上所述,多台和达法研究首都圈地区中强以上地震前波速比变化的异常特征很有意义,可从时间和空间2个方面为未来首都圈地区可能的中强以上地震提供时间尺度和空间方位的判断依据。但今后仍需继续积累震例经验,以便能更深入地开展地震预测的研究和应用工作。

目前,在地震研究工作中,数字地震学方法的应用越来越广泛,为了避免地震预测结果的随机性,提高预测效能,可以通过其他同样具有物理意义的数字地震学方法进行相互验证和相互补充。如陈学忠等(2011)、梁向军等(2014)应用震源参数视应力方法研究发现,在河北滦县 $M_L 5.0$ 、河北文安 $M_L 5.5$ 、山西大同 $M_L 5.0$ 地震前视应力均出现了明显的高值异常;王晓山等(2011)通过对震源机制解参数进行统计分析发现,河北文安地震前在震源区附近出现大范围的一致性参数低值区域;薛艳等(2010)利用小震精定位方法分析发现,在文安地震前,不同地壳深度地震活动的增强趋势。因此,以上地震学相关研究结果可以说明本文利用多台和达法研究首都圈中强震波速比计算过程的可靠性、异常存在的客观性,也进一步证明了本文结论的合理性。

致谢:感谢两位匿名审稿专家对论文修改提出的宝贵建议。

参考文献

- 蔡静观、雷素华,1996,澜沧-耿马地震前单台波速比突变异常的时空变化特征,中国地震,12(1),56~63。
- 蔡静观、张喜玲,1999,丽江、宁蒗强震的波速比时空演化图像和数值分析,中国地震,15(1),82。
- 陈学忠、李艳娥、郭祥云,2011,河北文安 $M_S 5.1$ 地震前首都圈及邻区震源动力学参数时空变化特征,地震,31(4),15~25。
- 冯德益,1981,地震波速异常,北京:地震出版社。
- 光春云、王赵丽,1994,山西中强地震前波速比异常研究,地震,14(2),54~63。
- 韩晓明、张建中、薛丁等,2010,呼和浩特-包头地区平均波速比研究,中国地震,26(4),418~425。
- 姜秀娥、陈非比,1981,用四震相法讨论唐山大震的波速异常,地球物理学报,24(1),107~116。
- 黎明晓、张晓东,2004,应用多台北测定华北地区地壳的平均波速比,地震,24(1),163~169。
- 李善邦,1981,中国地震,北京:地震出版社。
- 李艳娥、王林瑛、郑需要,2014,汶川地震前后波速比变化特征的再研究,地震学报,36(3),425~432。
- 李永莉、毛慧玲、苏有锦,2009,滇西地区近期强震的波速比异常演化,地震研究,32(1),6~11。
- 梁向军、李丽、宋美琴等,2014,山西地区视应力时空变化特征分析,中国地震,30(1),102~110。
- 刘海英、聂小红、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、郭永霞、刘芳等,2008,文安地震前后首都圈分区波速比时变特征,地震学报,30(3),240~253。
- 王晓山、刁桂琴、冯向东等,2011,2006年文安地震孕育、发生的应力场动态图像,地震研究,34(3),266~270。
- 薛艳、周龙泉、马宏生等,2010,利用小震重新定位结果研究河北文安地震前地震活动三维空间特征,地震,30(1),10~19。

- 岳晓媛、王林瑛、武安绪, 2008, 北京地区地震波速比异常变化与首都圈中等地震的关系研究, *地震地磁观测与研究*, **29**(3), 10~13。
- 张学民、张天中、李永红等, 2007, 山东地区多台波速比研究, *地震地质*, **29**(1), 95~104。
- 赵明淳、刁桂苓、张学民, 2005, 首都圈平均波速比分析, *西北地震学报*, **27**(3), 246~250。
- 周焕鹏, 1994, 苏鲁交界及南黄海地区地震波速比的变化研究, *地震*, **14**(2), 36~44。
- Aggarwal Y P, Sykes L R, Simpson D W, 1975, Spatial and temporal variations in t_s/t_p and in P wave residuals at Blue Mountain Lake, New York: Application to earthquake prediction, *J Geophys Res*, **80**(5), 718~732。
- Nakamura A, Hasegawa A, Hirata N, 2002, Temporal variations of seismic wave velocity associated with 1998 M6.1 Shizukuishi earthquake, *Pure Appl Geophys*, **159**, 1183~1204。
- Nur A, 1972, Dilatancy, pore fluids and premonitory variations of t_s/t_p travel times, *Bull Seism Soc Am*, **62**(5), 1217~1222。
- Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P, 1973, Earthquake prediction: A physical basis, *Science*, **181**(4102), 803~809。

Research on the spatial-temporal evolutionary characteristics of v_p/v_s before moderate-strong earthquake in the Capital Circle Region of China

Yue Xiaoyuan¹⁾ Wu Anxu¹⁾ Feng Gang¹⁾ Wu Minjie¹⁾ Li Hong¹⁾ Li Layue²⁾

1) Earthquake Administration of Beijing Municipality, Beijing 100080, China

2) First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China

Abstract Using the seismic waveform data recorded by the Capital Circle Digital Seismic Network of China, the Wadati method is applied to calculate velocity ratio in the Capital Circle Region of China during 2002–2014, the spatial-temporal variation of wave velocity ratio is analyzed before moderate-strong earthquake in the Capital Circle Region of China since 2002. We discussed precursory information of moderate-strong earthquake. In order to ensure the precision and stability of the results, we imposed restrictions on the computation condition. The calculating results shows that there was wave velocity ratio anomaly before many earthquakes in the Capital Circle Region. The low wave velocity ratio anomaly area appeared around the focal region and the earthquake location along the margin of this area, and provide a theoretical basis for the area of the earthquake prediction.

Key words: Wave velocity ratio Multi-station method Spatial-temporal evolution Low value anomaly The Capital Circle Region