

张琳琳、高朝军, 2016, 新疆天山地区的波速比异常分析, 中国地震, 32(1), 118~126。

新疆天山地区的波速比异常分析

张琳琳¹⁾ 高朝军²⁾

1) 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐市北京南路 42 号 830011

2) 新疆巴里坤地震台, 新疆哈密 839200

摘要 收集整理新疆地震台网 2009~2014 年的地震观测数据, 利用多台和达法计算了新疆天山地区中小地震的波速比及其背景值。为了突出异常变化, 分析了研究区内的波速比扰动值变化, 同时回溯了天山地区 7 次中强地震。结果表明: ①天山地区波速比的背景值为 1.70 左右, 自 2013 年开始, 波速比的低值异常主要集中在天山中东段及普昌断裂附近; ②2011~2013 年研究区内 4 次 $M_s 5.0$ 以上地震前, 震中位置波速比扰动值多数处于低值状态; ③7 次中强地震前, 震中及其附近区域波速比低值的地震事件占相应时段内总事件的比率大于 60%, 研究区内中强地震前波速比呈低值状态较明显。

关键词: 地震观测报告 多台和达法 波速比扰动值 天山地区

[文章编号] 1001-4683(2016)01-0118-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

在地壳演化过程中, 介质的物理状态会发生一系列变化。地震波携带着大量反映震源和介质变化的信息, 当地震波通过地壳介质时, 其速度会发生变化, 而波速比作为地震波的运动学特征, 可用其捕捉中强地震前后的异常变化信息, 这也是利用波速比研究地下介质物理性质变化的重要依据。通过对地震波波速比变化的研究, 发现其与中强震有对应关系, 因此, 将波速比变化作为监测手段来预测未来较大地震则成为地震分析预测研究的重要方法(冯德益, 1981; 蔡杏辉, 2013; 李海兵等, 2008; 张博等, 2013; 张洪艳等, 2010; 韩晓明等, 2009; 龙海英等, 2011a、2011b; 张晖等, 2014)。

1956 年, 宫本贞夫通过研究福井 7.2 级地震发现, 震前存在首波走时异常引起的波速异常现象(冯德益等, 1981)。此后国内外地震工作者对波速异常开展了大量研究, 同时多种波速异常研究方法也相继出现(隗永刚等, 2014)。近年来, 随着数字地震学方法的不断推广以及数字地震波形资料的积累, 对波速比变化特征的研究逐渐增多(王林瑛等, 2011; 韩晓明等, 2010; 龙海英等, 2011a, 2011b), 同时也获得了不同研究区内中强地震前波速比的空间分布和时序变化特征等研究成果, 为中强地震活动的趋势研判提供了依据, 也进一步检验了中强地震前波速比异常存在的可信度(岳晓媛等, 2008; 陈俊华等, 2007; 黎明晓等, 2004)。

[收稿日期] 2015-07-29; [修定日期] 2015-12-08

[项目类别] 新疆地震科学基金(201404)及中国地震局震情跟踪定向工作任务(2015010122)联合资助

[作者简介] 张琳琳, 女, 1986 年生, 工程师, 主要从事地震预测、地震活动性研究。E-mail: zly606@126.com

随着新疆“十五”地震台网的建立,台站密度增大,仪器观测精度提高,这为新疆波速比研究创造了良好条件。龙海英等(2011a、2011b)分别对新疆乌苏 5.1 级及和静 5.6 级地震前的波速比异常进行了深入研究,认为地震发生在波速比的一个近似椭圆形低值异常区,同时在低值出现 9~10 个月之后发震。高朝军等(2013)采用天山中段数字化地震资料分析了 2012 年 6 月 30 日新源、和静 6.6 级地震前后的波速比异常,结果认为地震发生在波速比低值异常区的东北缘。

本文选取 2009 年 1 月 1 日~2014 年 9 月 30 日新疆区域台网记录到的天山地震带 $M_s \geq 1.0$ 的地震数据,利用多台和达法计算了天山地区中小地震波速比实际值和背景值,其中波速比背景值是无中强地震发生时 V_p 与 V_s 的比值,文中将以 2009 年数据为基础求解的波速比值作为背景值。实际值即当有较大地震发生时的 V_p 与 V_s 的比值。为突出异常变化,本文计算了波速比的扰动值(实际值相对于背景值的变化),通过对 2011 年以来 4 次中强地震前波速比扰动值空间分布变化的分析,得出波速比异常变化与中强地震之间的关系,同时对近 1 年来新疆天山地区波速比扰动值变化与地震的对应情况进行了分析和讨论。

1 新疆天山地区地震地质背景

新疆天山造山带是全球主要的古生代造山带之一,包括 2 个碰撞带,即 1 个较老的南部碰撞带(位于塔里木地块北侧陆缘和中天山南侧陆缘之间)和 1 个较年轻的沿北天山断层的碰撞带(肖龙,1999)。该地区地质结构复杂,受印度洋板块向北推挤和兴都库什地区的挤压作用,天山地区地壳不断隆升,并在两侧山前拗陷或前陆盆地内形成多个逆冲-褶皱带(高朝军等,2013),其中天山中段覆盖了南天山东段和中天山南缘构造带。研究人员针对新疆天山中东段地区开展了一些波速比研究,20 世纪 80 年代初,一些学者利用模拟地震波资料对新疆部分中强地震前后的波速比异常做了系统研究(王海涛,1989;敖雪明,1987),发现多数中强地震前波速或波速比出现较明显的变化。近几年来,龙海英等(2011a、2011b)和高朝军等(2013)对天山中东段几次中强地震前波速比异常变化特征进行了分析,中强地震前波速比异常形成不同形状的低值区,异常出现后 1 年内在异常区内部或边缘发生中强地震。自 2000 年以来新疆区域数字地震台网逐步建成后,地震监测能力大幅度提高。但由于受台站布设环境的影响,天山中东段台网布局相对于南天山西段更为均匀(图 1)。而新疆境内 $M_s \geq 1.0$ 地震主要集中在天山中东段和南天山西段,且主要沿断裂带分布,其中天山中东段乌鲁木齐附近区域台站密度较大,因此,所记录的小地震数据相对较多,而南天山西段台站较为稀疏,中强地震活动水平较高,满足波速比求解标准的地震数据相对于天山中东段略少。为进一步了解新疆天山地区地震波的运动学特征即波速比变化,在满足技术要求和求解标准的前提下,选择天山中东段和南天山西段作为本文的研究区域,以捕捉中强地震前的波速比异常信息。

2 研究方法 with 原理

基于多台和达法求解波速比的原理,采用新疆天山地区的研究数据,对一个地震以一组台站 i 记录的纵波到时 T_{pi} 和纵波与横波间的到时差 $T_{si} - T_{pi}$ 为资料作图,拟合直线求斜率,再加 1 即为波速比(冯德益,1981)。假设所选研究区为理想的均匀弹性介质,以多台记录到

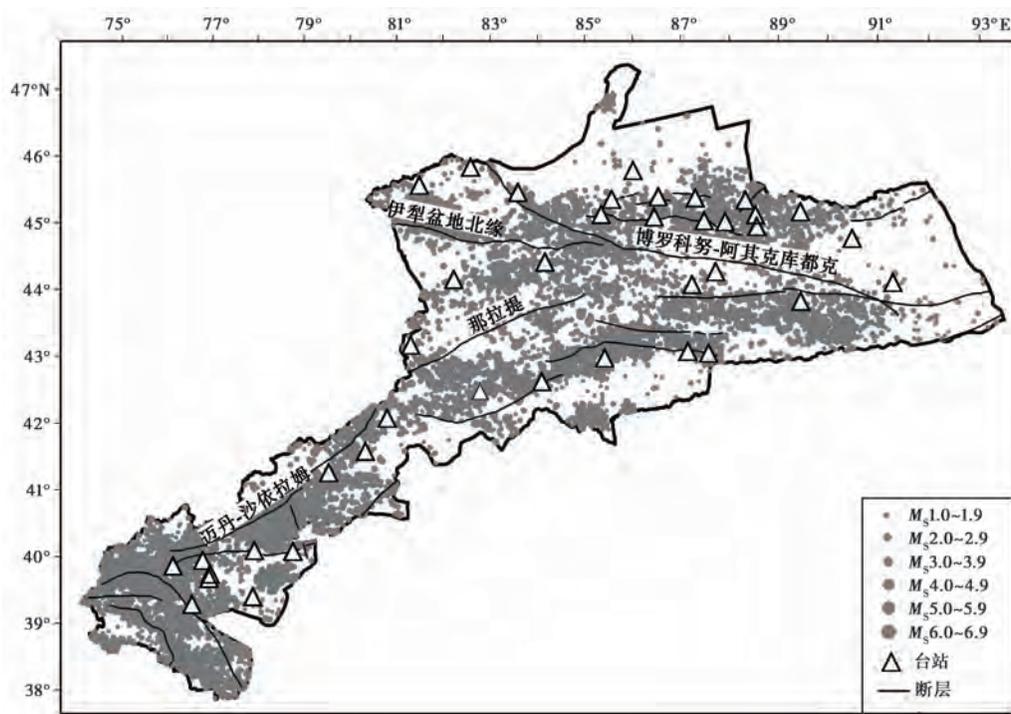


图 1 新疆天山地区地震台站分布及研究区域内震中分布图

的近震直达 P 波、S 波到时 T_{P_i} 、 T_{S_i} 计算波速比 γ 、相关系数 R 和标准差 S 的计算公式为

$$\gamma = \frac{V_P}{V_S} = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Delta T_i \right)^2}{n \sum_{i=1}^n (\Delta T_i \cdot T_{P_i}) - \sum_{i=1}^n T_{P_i} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta T_i} \quad (1)$$

式(1)中, n 为台站个数; $\Delta T_i = T_{S_i} - T_{P_i}$ 为第 i 个台站记录到的横波和纵波的到时差, 则

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{P_i} - \bar{T}_P) \cdot (\Delta T_i - \bar{\Delta T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}_P)^2 - \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \bar{\Delta T})^2}} \quad (2)$$

其中, $\bar{T}_P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{P_i}$, $\bar{\Delta T}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i$

$$S = \sqrt{\frac{(1 - R)^2 \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \bar{\Delta T})^2}{n - 2}} \quad (3)$$

$$\gamma_d = \frac{(\gamma_a - \gamma_b)}{\gamma_a} \quad (4)$$

式(4)中, γ_d 为波速比扰动值; γ_a 为波速比实际值; γ_b 为波速比的背景值, 有关实际值和背景值的概念说明已在引言中给出。

结合前人对新疆天山地区波速比研究成果,基于新疆地震台网 2009~2014 年的地震观测数据,采用多台和达法计算天山地区震中周围多台(台站数目不少于 4 个)平均波速比值,考虑到研究数据波速比计算结果的异常变化并使其更明显,我们计算了波速比的扰动值((4)式),同时分析其时空演变特征以及通过震例回溯探索波速比异常变化与中强地震之间的关系。

3 资料选取

本文资料来自新疆地震局提供的 2009 年 1 月 1 日~2014 年 9 月 30 日新疆天山地区 15543 次 $M_s 1.0$ 以上地震的观测数据。依据多台和达法计算原理,按照地震事件至少被 4 个台站记录到的标准,共选取地震事件 9590 次,可利用的地震数据占总数据的 61.7%。为保证样本数和数据精度要求,在已选的 9590 次地震事件中,再参照波速比标准误差 ≤ 0.05 、相关系数 ≥ 0.98 的标准,共选出地震事件 1755 次。在计算波速比扰动值之前,首先需要计算波速比(包括实际值和背景值),同时参照前人的筛选方式对所选用资料进行筛选和预处理(高朝军等,2013)。采用前述预处理后的地震数据,首先按照研究区设定范围参数,将研究区进行 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 网格划分,并求得每个网格的波速比背景值,背景值主要是基于研究区域内无中强地震发生的时段进行计算;然后选择 2013 年以来的地震数据获取相应波速比实际值,同时求解波速比的扰动值,并对其时空变化特征进行分析;最后,结合 2011~2013 年 4 次中强地震前波速比扰动值空间分布情况,分析中强地震前波速比扰动值变化特征。波速比扰动值的计算主要是依据研究区内满足条件的地震数据,一般为低值负异常。

4 震例回溯

4.1 新疆天山地区波速比背景值

刘文学等(2011)采用修订后的接收函数 $H-\kappa$ 叠加算法估计了新疆及周边地区 90 个地震台站下的波速比,波速比的估计结果为 1.61~1.89,均值为 1.76。结合前人研究结果,本文采用多台和达法对新疆天山地区波速比展开研究,结果表明,研究区内波速比为 1.65~1.78,均值为 1.70 左右。

4.2 天山地区的 7 次震例

为突出研究区内波速比异常的空间分布,将研究区分为天山中东段和南天山西段 2 个子研究区。图 2(a)和图 2(b)显示的是天山中东段和南天山西段 2013 年 1 月~2014 年 9 月波速比扰动值空间分布,结果表明,天山中东段的温泉-新源地区和乌鲁木齐南部地区以及南天山西段的柯坪块体波速比扰动值存在低值异常,其中,新源西部的波速比扰动低值形成一个不规则的椭圆形,而乌鲁木齐附近区域和南天山西段的普昌断裂以西波速比扰动低值变化幅度较大,其辐射范围相对集中。

通过计算,得到了上述 2 个区域的波速比时序图(图 3),其中图 2(a)中 2 个虚线圈所圈定区域分别与图 3(a)和图 3(b)中的时序图内容相对应。结合研究区内的 3 次震例分析,中强地震之前波速比均显现出一定的异常变化特征,其中天山中东段的 2 次地震前波速比总体呈现出“下降-低值-恢复-发震”变化趋势,异常持续时间为 3 个月左右,异常变化幅度为 5%左右,尤其是异常上升幅度相对较大,并发生在“低值-回升-发震”过程中,多数地震前

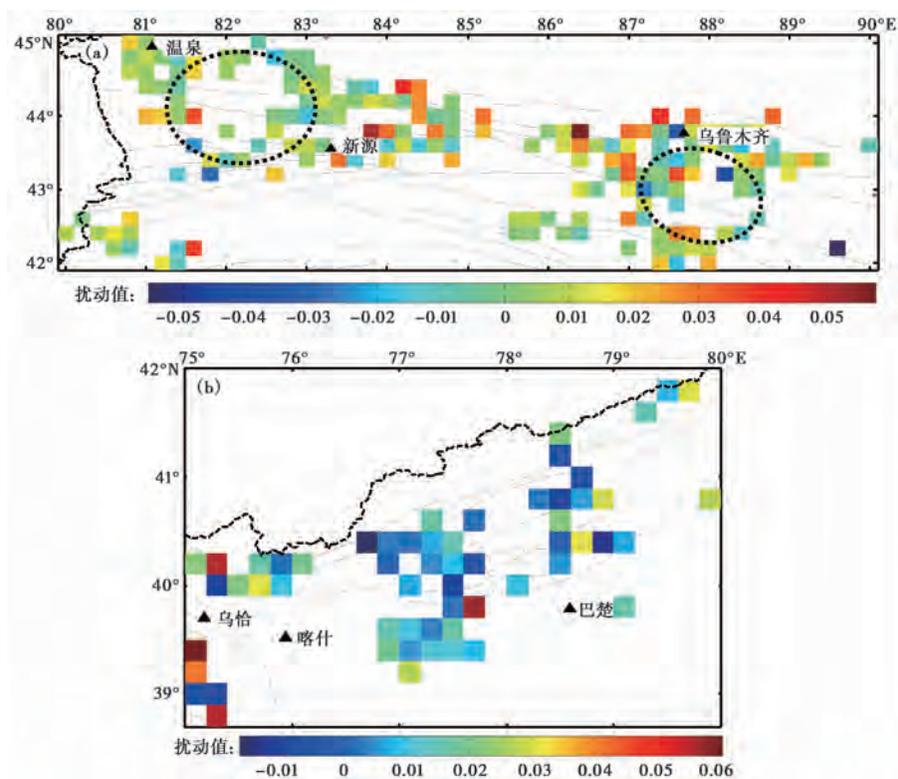


图2 2013年1月~2014年9月天山地区波速比扰动值分布图

(a) 天山中东段; (b) 南天山西段

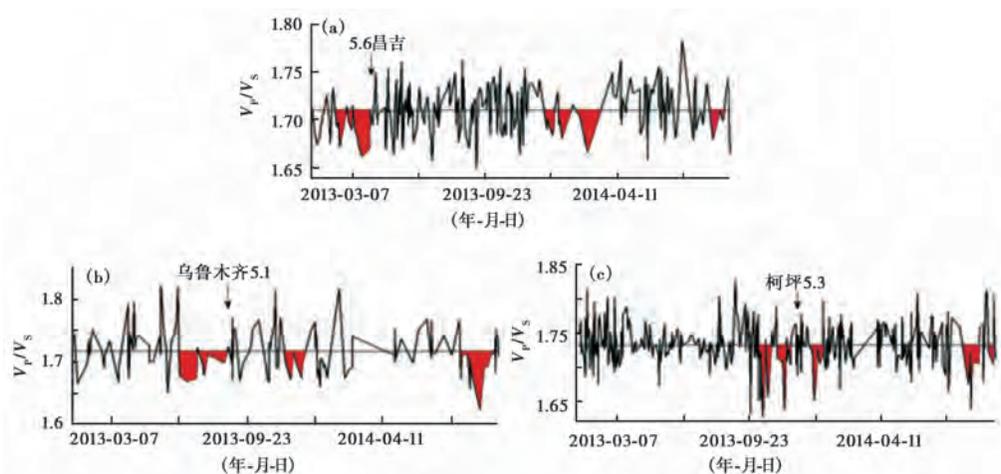


图3 2013年1月~2014年9月2个扰动值异常区波速比时序图

(a) 温泉-新源地区; (b) 乌鲁木齐南部地区; (c) 柯坪块体

出现了“低值-恢复”过程。如乌鲁木齐南部地区在2013年3月29日昌吉5.6级地震和8月30日乌鲁木齐5.1级地震之前波速比出现低值异常过程(图3(a),3(b)),波速比高值恢复

过程中发震。2013 年 12 月 1 日柯坪 5.3 级地震之前柯坪块体波速比处于低值状态(图 3(c)),3 个子区域时序图之后的时间内波速比出现低值-恢复状态,但没有地震发生,说明此异常对应率并非 100%。目前乌鲁木齐南部地区、温泉-新源地区以及柯坪块体波速比时序曲线呈现出“下降-低值-恢复”变化趋势,而该现象很可能是中强地震发生前的一种表现,也意味着这 3 个子区域地下介质应力可能正处于积累的过程中,需要加强关注。

随着数字监测台网密度的增加,局部监测能力逐步提高,研究区内监测到的地震的最小完整性震级降低,尤其是台站布设相对均匀的天山中东段。新疆天山地区是中强地震频发区域,2011 年以来共发生 16 次 $M_s 5.0$ 以上中强地震。本文分析了 2011~2013 年 4 次 $M_s 5.0$ 以上中强地震前的波速比扰动值变化,这 4 次地震分别位于天山中东段和南天山西段。从天山中东段分区的波速比扰动值分布(图 4、5、6)可以看出,2011 年 11 月 1 日尼勒克和巩留交界处的 6.0 级地震发生在波速比扰动的低值异常区域(图 4),自 2009 年 1 月~2011 年 11 月 1 日 $M_s 6.0$ 地震前,震中及其附近区域满足波速比计算条件的地震事件共 894 次,而自 2011 年 1 月开始,波速比值低于 1.71 的地震共 267 次,占 $M_s 6.0$ 地震前中小地震事件总数的 65%。2012 年 6 月 30 日新源、和静交界 6.6 级地震前,新源附近区域波速比扰动值形成不规

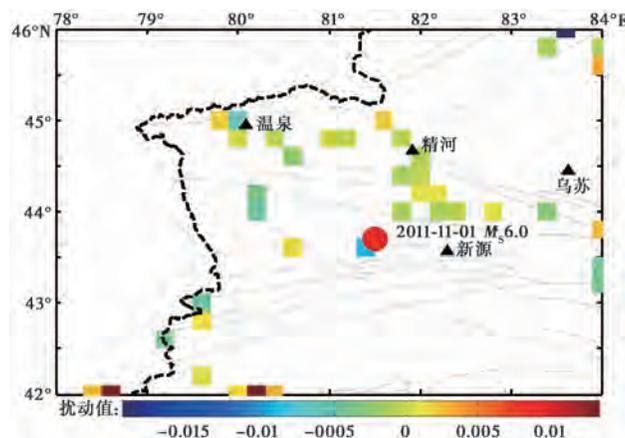


图 4 2009 年 1 月~2011 年 10 月新源附近波速比扰动值分布图

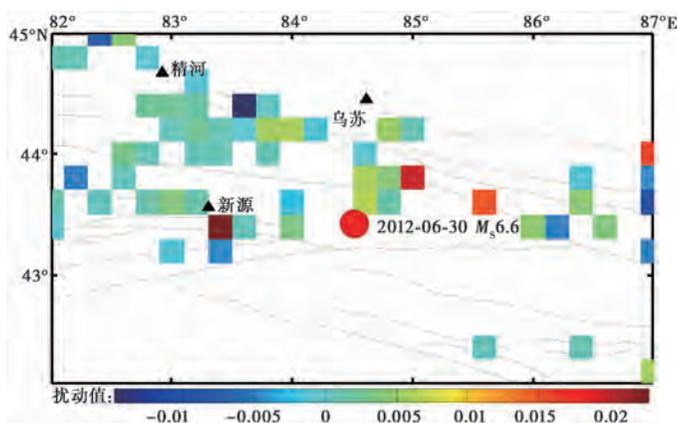


图 5 2009 年 1 月~2012 年 6 月新源附近波速比扰动值分布图

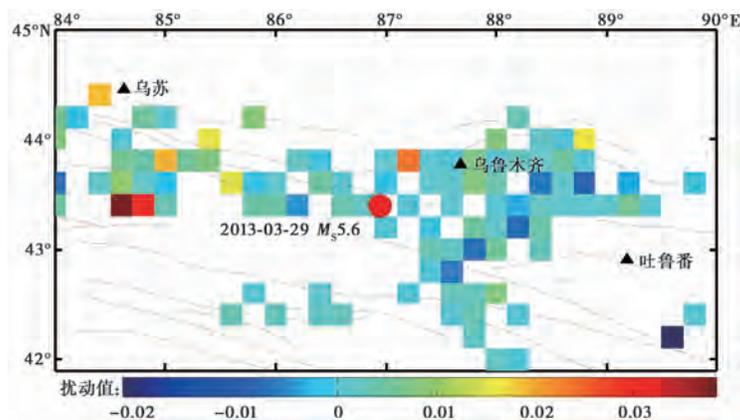


图6 2009年1月~2013年3月乌鲁木齐附近波速比扰动值分布图

则的半椭圆形低值区,而主震震中位于半椭圆的端部(图5),2009年1月~2012年6月30日 M_s 6.6地震前,其相应研究区域内共有1055次地震事件满足波速比的求解条件;2011年11月1日 M_s 6.0地震发生后,波速比值低于1.71的地震共106次,占主震前中小地震事件总数的63.5%;2011年11月1日 M_s 6.0地震前该区域的波速比低值异常可能仍与此次 M_s 6.6地震有关。北天山中东段2009年1月~2013年3月波速比扰动值空间变化显示(图6),在扰动的低值集中区发生了2013年3月29日乌鲁木齐、昌吉交界5.6级地震,2009年1月至此次地震前,其震中及其附近区域共有1318次地震事件满足波速比的计算要求。2013年1月至 M_s 5.6地震发生的时间段内,波速比值低于1.72的地震共23次,占 M_s 5.6地震前中小地震事件总数的62%。图7给出了南天山西段阿合奇西南区2009年1月~2011年7月波速比扰动值的空间变化,在2个波速比扰动低值区的中间位置发生了2011年8月11日阿图什-伽师5.6级地震。2009年1月至该地震发生前,此地震震中及其附近区域共有665次地震事件可用来求解波速比。而自2011年1月至 M_s 5.6地震发生,共有88次地震事件的波速比值低于1.73,占 M_s 5.6地震前中小地震事件总数的52.4%。从4次中强地震前波速比扰动值的变化中可以看出,波速比异常多数分布在断裂带两侧和不同方向断裂的交汇部位,多数

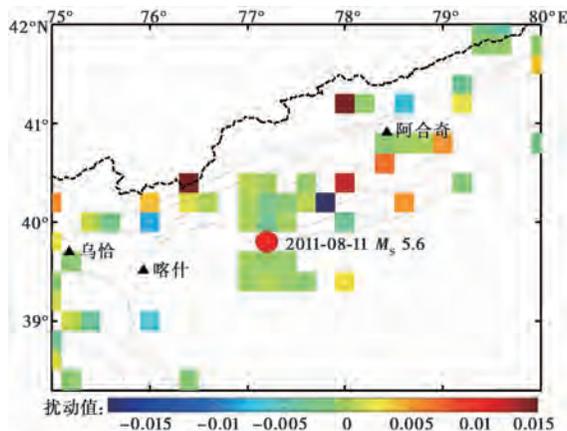


图7 2009年1月~2011年7月阿合奇西南波速比扰动值分布图

断裂具有控震背景,地下介质物理性质较为复杂,波速比低值异常区及其附近区域的地下介质应力积累水平则相对较高,具有发生中强地震的地质构造条件。

5 结论与讨论

本文通过对新疆天山地区 2009 年以来地震波速比进行计算,得出天山地区波速比扰动值时空变化图,并结合 2011~2013 年 4 次震例分析了波速比扰动值在中强地震前的一些变化,最后得出以下结论:

(1)2009~2014 年新疆天山地区波速比平均值为 1.70,基本波动范围为 1.65~1.78。结合 3 次震例分析,中强地震前波速比呈现出一定的异常特征,变化幅度在 5%左右,震前总体表现为“下降-低值-恢复-发震”这一变化过程,异常持续时间为 3 个月左右。综合分析 7 次中强地震前波速比的变化情况,震前震中及其附近区域在一定时间段内波速比低值的地震事件占相应总事件数的比率大于 60%,中强地震前波速比低值相对明显。

(2)结合 4 次震例,分析 2013 年以来研究区内波速比扰动值时空变化,可以看出,天山中东段的温泉-新源、乌鲁木齐南部地区以及南天山西段的柯坪块体区存在波速比扰动的低值异常。这 2 个子区域地震活动水平较高,地下构造背景复杂,波速比扰动值高低交替分布,分布区域大小以及集中程度与台站密度和满足波速比计算条件的地震事件数有关。地震活动性不同的区域,其地下介质应力状态的变化及应力作用也有所差异,波速比扰动值变化较大的区域其地质构造应力变化也相应较为显著,应力积累处于一个逐步加强的过程,因而发生中强地震的可能性较大,需要加强对这几个子区域的波速比以及其他地震学参数变化的进一步跟踪和研究。4 次震例的波速比扰动值时空变化分析发现,多数中强地震发生在波速比扰动的低值集中区域,波速比扰动值异常大多分布在断裂带两侧和多条断裂的交汇部位,相应研究区内地下介质应力变化和相互作用比较显著,具备发生中强地震的地质构造条件。

(3)由于本文所用数据取自 2009 年以后,未采用此前模拟记录的地震数据,因此不能较完整地展现有地震记录以来新疆天山地区波速比的变化情况,且新疆南天山西段台站密度相对于天山中东段少,分布不均匀,区域划分的精度不够精细,记录的震例也相对较少,所获取的结果受资料影响较大。随着数字化地震数据数量和质量的不断增加和提高,波速比研究结果的精度和可靠性将会进一步提高。

致谢:新疆地震局提供了研究数据,李志海在波速比扰动值计算方面、王琼在震例分析研究上提出了意见和建议,审稿老师提出的意见和建议让本文增色不少,在此一并致谢。

参考文献

- 敖雪明、王桂岭,1987,新疆一些中强震前后的波速比变化,内陆地震,1(1),67~76。
蔡杏辉,2013,福建地区平均波速比的测定及初步分析,高原地震,25(4),31~34。
陈俊华、甘家思、李普丽等,2007,三峡水库蓄水后巴东地区波速比(V_p/V_s)研究,大地测量与地球动力学,27(专辑),12~14。
冯德益,1981,地震波速异常,1~14,北京:地震出版社。
高朝军、宋春燕、张琳琳等,2013,新疆新源、和静交界 6.6 级地震前后波速比异常特征研究,内陆地震,27(2),121~126。
韩晓明、王鑫、郝美仙,2009,赤峰-辽蒙交界地区地震活动性及平均波速比分析,高原地震,21(3),11~16。

- 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。
- 黎明晓、张晓东,2004,应用多台法测定华北地区地壳的平均波速比,地震,24(1),163~169。
- 李海兵、王宗秀、付小方等,2008,2008年5月12日汶川地震($M_s 8.0$)地表破裂带的分布特征,中国地质,35(5),803~813。
- 刘文学、刘贵忠、周刚等,2011,新疆和周边地区地壳厚度和 V_p/V_s 比值变化的接受函数约束,地球物理学报,2011,54(8),2034~2041。
- 龙海英、聂晓红、唐兰兰,2011a,新疆和静 5.6 级地震前波速比异常震例分析,中国地震,27(2),147~154。
- 龙海英、聂晓红、唐兰兰,2011b,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。
- 王海涛,1989,单台波速比异常,内陆地震,3(2),181~183。
- 王林瑛、李艳娥、李芳等,2011,汶川地震前后地震波比和视速度变化特征的研究,地震学报,33(1),1~14。
- 隋永刚、陈学忠、郭祥云等,2014,芦山 7.0 级地震前单台波速比异常变化研究,地震,34(2),105~114。
- 肖龙,1999,新疆天山造山带地质构造研究进展——兼论陆间型造山带形成的五阶段模式,桂林工学院学报,19(4),315~320。
- 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。
- 张博、冯建刚、张辉等,2013,甘肃岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震序列波速比变化特征研究,地震工程学报,35(3),557~561。
- 张洪艳、高金哲、卢燕红等,2010,吉林地区平均波速比的测定及研究,防灾减灾学报,26(4),30~31。
- 张晖、高立新、韩晓明,2014,内蒙古东部地区波速比变化特征研究,地震工程学报,35(4),921~927。

Analysis of wave velocity ratio anomalies in the Tianshan region, Xinjiang

Zhang Linlin¹⁾ Gao Chaojun²⁾

1) Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

2) Barkol Seismic Station, Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Hami 839200, Xinjiang, China

Abstract Based on the seismic observation report data provided by Xinjiang Digital Seismic Network from 2009 to 2014, we calculated the wave velocity ratio and its background value for medium and small earthquakes by using the multi-station method in the Tianshan region, Xinjiang. This paper analyses the variation of wave velocity ratio disturbance value to highlight the anomaly and also trace back seven moderate earthquakes at research area. The results show that: (1) the background value of the wave velocity ratio is almost 1.70. The wave velocity ratio obviously decreased in middle-eastern part of Tianshan Mountains and the region near Puchang Fault; (2) the wave velocity ratio disturbance value is lower at the epicenter before 4 earthquakes with $M \geq 5.0$ from 2011 to 2013 of the study area; (3) before 7 moderately strong earthquakes, the earthquake events with low value of wave velocity ratio account for over 60% of corresponding total events near the epicenter. The low value of wave velocity ratio is relatively obvious before moderate earthquakes.

Key words: Seismic observation report Multi-station method Wave velocity ratio disturbance value Tianshan region