

沂沭断裂带及附近地区分段平均波速比研究*

李霞, 周彦文, 赵瑞, 刘瑞峰, 钟普浴, 王峰

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要:以山东省数字地震台网产出的观测报告为基础, 将沂沭断裂带及附近地区划分成4个子区域, 利用多台和达法分别计算出了2002年1月至2012年4月各个子区域内中小地震平均波速比, 并对其时空分布特征进行了比较。结果表明: (1) 郯城—高桥段、莱州湾及附近海域平均波速比略低于孟疃—潍坊段和新沂—宿迁段, 沂沭带主干断裂波速比基本分布在1.69~1.73之间, 胶东半岛北部海域(120.5°E以东区域)波速比明显偏低, 最低值为1.63; (2) 研究区中小地震震源深度与其波速比没有明显相依关系, 震源深度优势分布范围为5~20 km, 反映了研究区中、上地壳介质的横向不均匀性; (3) 波速比计算中, 台站数目越多波速比计算误差越小, 合适的空间范围的划分能更真实反映介质的变化。

关键词:沂沭断裂带; 平均波速比; 剩余标准差; 介质状态

中图分类号: P315.73

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)02-0148-07

0 引言

波速比是P和S波速度的比值, 由于比值消除了介质密度和杨氏模量的共性因素影响, 所以仅反映泊松比的改变。泊松比的物理意义是介质横向缩短与纵向长度伸长之比, 因此波速比所反映的是介质的弹性形变特征。地震波传播速度和波速比在较大地震前后会出现异常变化, 并且异常出现的时间、发展过程和空间范围都具有一定的特征。我国自20世纪70年代开始开展波速比的研究, 冯德益(1981)总结了波速比异常时间、幅度、形态与强震的关系; 陆远忠和陈章立(1985)、梅世蓉等(1993)参考波速比异常预报地震; 嘉世旭和刘昌铨(1996)、傅征祥和程燕(1988)讨论了不同震源区波速比与中强震的关系。

近几年来, 随着数字地震观测系统的改进和台站布局密度的增大, 以及震相资料的不断积累和观测精度的提高, 利用数字地震资料分析中强震前后地震波速的变化取得了许多新的进展。例如美国在“帕克菲尔德圣安德烈斯断层深部探测计划”中发现了两次小震前存在波速变化(Niu, 2008), 张小涛等(2006)、李永莉等(2008)利

用数字地震观测资料对九江—瑞昌地震序列的波速比特征和云南地区中强地震前后波速比的变化形态进行了研究, 都发现震前存在波速异常。山东省数字地震观测台网自2001年至今已逐渐发展完善, 积累了丰富的中小地震观测资料, 尤其是沂沭断裂带及附近地区, 台站分布密度最大, 监测能力最强($M_L 0.8$), 为本文利用数字地震资料研究沂沭断裂带及附近地区波速比的时、空分布特征及了解地下介质在不同区段的细节差异提供了较好的基础条件。

1 研究区域概况

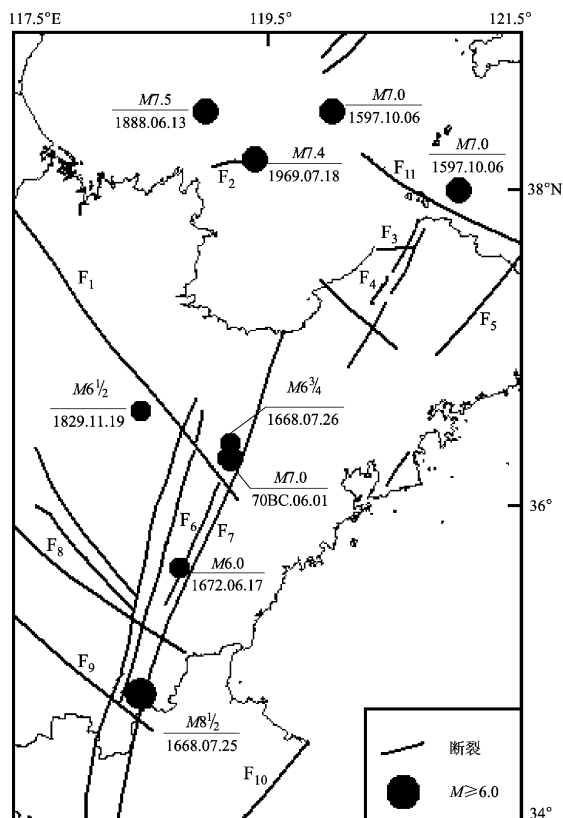
1.1 研究区地震地质背景及观测条件

沂沭断裂带是郯庐深断裂穿过山东境内的区段, 北起莱州湾, 南至江苏新沂, 主要由4条主干断裂组成“两堑夹一垒”的地质构造。在沂沭断裂带的东西两侧, 一系列规模不等的NE和NW、NWW向断裂, 与沂沭带一起构成了区内活动断裂的主体。特别是一些NW向断裂, 活动时期在晚更新世末至全新世初, 与沂沭断裂带强烈活动时期一致(满洪敏, 2005)。在沂沭带以北的渤海凹陷区内广泛发育着NE和NW、NWW以及近EW向多组活动断裂, 其中NWW向张家口—蓬莱断裂规

* 收稿日期: 2012-09-13.

基金项目: 山东省自然科学基金青年项目(ZR2012DQ009)、国家科技支撑计划课题(2012BAK1904)、山东省地震局重点基金青年项目(JJ1207Y)和中国大陆7-8级地震中长期危险性预测研究专项联合资助。

模最大,是华北地区7级强震复发周期最短的区域。据历史文献记载及近代中小地震记录,自公元前70年至今,沂沭带主干断裂区发生6级以上的地震4次,北西向次级断裂发生6级以上的地震1次,北部渤中凹陷区及胶东半岛北部海域发生7级以上的地震4次,其中1668年郯城8½级地震是中国东部发生的最为强烈的地震(图1)。



F₁: 无棣—益都断裂; F₂: 冀北断裂; F₃: 黄县断裂; F₄: 风仪店断裂; F₅: 桃村—东陵山断裂; F₆: 安丘—莒县断裂; F₇: 昌邑—大店断裂; F₈: 蒙山断裂; F₉: 苍山尼断裂; F₁₀: 响水—嘉比断裂; F₁₁: 威海蓬莱断裂

图1 研究区域断裂带及历史中强地震分布

Fig. 1 Distribution of the faults and historical medium-strong earthquakes in study area

自科技部“十五”攻关项目实施以来,沂沭断裂带及周围地区增加、改造了大量数字地震台站,由“九五”时期的12个数字记录台增加到目前的37个,观测设备由短周期地震计全部升级为宽频带、甚宽频带地震计,采样率由50 sps提高到100 sps,使该区域台网布局、监测能力、观测精度和观测数据的利用率都得到了很大幅度的提升,具体台站和中小地震震中分布见图2。

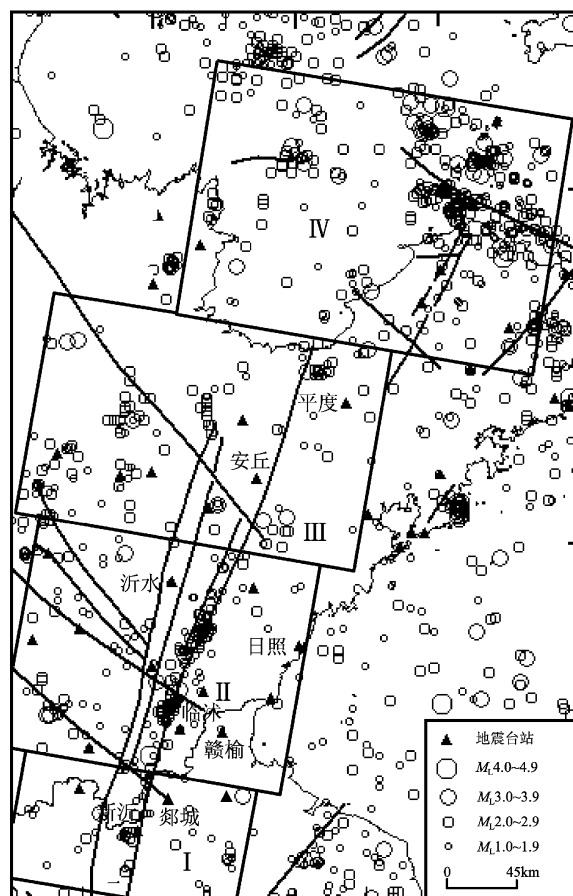


图2 沂沭断裂带及附近地区台站分布及子区域划分 ($M_L \geq 1.0$, 2002-01~2012-04)

Fig. 2 The station distribution and sub-region division in Yishu Fault and its adjacent areas ($M_L \geq 1.0$, 2002-01~2012-04)

1.2 研究区地震活动及子区域划分

根据沂沭断裂带及附近地区地质构造特点、台站布局及2002年以来中小地震空间分布特征对研究区进行分段。沂沭断裂带主干地区现代中小地震活动在空间分布上南北分段性表现明显。沿N36°线南北两侧,小震频度及空间分布差异显著:其北部地震活动频度低,空间分布零散;其南部则相反,地震活动频度高,主要沿沂沭走向分布;另外依据小震震源机制解所推断出的沂沭断裂带现代构造应力场取向(魏光兴等,1988),将N36°线以南区域沿窑上一麦坡再划分成两个子区域,加上莱州湾及附近海域,由南向北将研究区划分成4个子区域(图2):

I区:新沂—宿迁,空间范围约为 $0.72^\circ \times 1.6^\circ$,共计32次地震,震级范围 $M_L 0.6 \sim 4.3$,子区域内布设观测台站5个,震源机制P轴取向大致

为近东西向。

Ⅱ区：郯城—高桥，空间范围约为 $1.33^\circ \times 2^\circ$ ，共计 157 次地震，震级范围 $M_L 0.6 \sim 3.4$ ，子区域内布设观测台站 15 个，震源机制 P 轴取向为北东或北东东向。

Ⅲ区：孟瞳—潍坊，空间范围约为 $1.3^\circ \times 2.3^\circ$ ，共计 117 次地震，震级范围 $M_L 1.3 \sim 3.7$ ，子区域内布设观测台站 10 个，震源机制 P 轴取向似为北西西向。

Ⅳ区：莱州湾及附近海域，空间范围约为 $1.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，共计 355 次地震，震级范围 $M_L 0.7 \sim 4.4$ ，子区域内布设观测台站 8 个，震源机制较为复杂，P 轴的优势取向大致为近东西向。

2 资料处理与结果分析

2.1 计算方法与资料处理

本文采用的计算方法为多台和达法，是由日本地震学家和达清夫（Wadati, 1928）提出。其计算公式有两种（黎明晓，张晓东，2004），通过公式换算可以发现两种计算公式的原理是一致的。其原理为在假定震源区到地表介质是均匀各向同性的条件下，一次地震事件以一组台站记录到的直达 P、S 波到时差与 P 波走时拟合的线性关系得到波速比 $r = v_p/v_s$ ，以及线性相关系数 R 和波速比剩余标准差 S 分别为

$$r = v_p/v_s = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta T_i)^2}{n \sum_{i=1}^n \Delta T_i T_{Pi} - \sum_{i=1}^n T_{Pi} \sum_{i=1}^n \Delta T_i}, \quad (1)$$

式中， n 为台站个数， $\Delta T_i = T_{Si} - T_{Pi}$ 。

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

其中， $\bar{T}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{Pi}$ ， $\Delta \bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i$ 。

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

基于山东省地震台网中心提供的 2002 年 1 月 1 日至 2012 年 4 月 30 日沂沭断裂带及周围地区中小地震观测报告，利用各子区域内观测台站所记录震相到时数据对相应区域内每次地震事件做和达直线，同时对偏离直线的震相到时数据进行校对和修正，有些偏离较大而无法校正的，予以剔除。其中郯城台位于 I 区和 II 区的分界线上，因此在 I、II 区波速比计算中均用到郯城台记录资料。为保证计算结果的可靠性，我们做了如下约定：要求一次地震事件至少有 4 个以上台站同时记录到初动清晰的直达波到时数据；选取 S 波与 P 波到时差在 2 ~ 23 s 之间的台站记录，且内陆地震 T_{S-P} 要求不大于 15 s，海域地震 T_{S-P} 增加到 23 s；波速比剩余标准差小于 0.05（包含 0.05）及直线拟合相关系数大于 0.95。由于计算条件的限制，整个研究时段内震级范围在 1.0 ~ 4.4，震源深度在 30 km 以内（含 30 km）共计 662 次地震参与波速比计算，符合计算约定的地震事件共 568 次，占可计算波速比地震事件总数的 85.80%。

2.2 计算结果分析

计算研究时段内各子区域中小地震多台波速比并做时序曲线见图 3。由图可见，各子区域波速比原始曲线随时间变化起伏较大，不利于长期趋势性变化的分析，因此我们对其进行了 5 点 3 次的平滑处理。经近均值处理后各子区域波速比涨落幅度明显减小，在均值线附近波动。

(1) 新沂—宿迁地区（I 区）。研究时段内该子区域共计 27 次有效波速比中，最低值为 1.67，最高值为 1.79，平均波速比为 1.724，标准方差为 0.030 1。如图 3a 所示，波速比 5 点 3 次滑动平均值都在一倍方差范围内波动，仅 2010 年 1 ~ 12 月出现相对低值区间，至 2011 年 1 月后波速比恢复到均值线附近。

(2) 郯城—高桥地区（II 区）。研究时段内该子区域共计 143 次有效波速比，最低值为 1.59，最高值为 1.75，平均波速比为 1.713，标准方差为 0.022 5。如图 3b 所示，除 2002 年 3 月 2 日莒县 1.7 级地震波速比为 1.59 外，整个研究区波速比滑动平均值变化平稳，2010 年 4 月波速比滑动平均值较前略有下降，与 I 区波速比低值区间同步，距离最近发生的是 2011 年 5 月 20 日沂水北 $M_L 3.7$ 地震。

(3) 孟瞳—潍坊地区（III 区）。2003 年 1 月 ~ 2012 年 4 月该子区域共计 101 次有效波速比中，

最低值 1.62, 最高值为 1.83, 平均波速比为 1.723, 标准方差为 0.028 3。如图 3c 所示, 波速比 5 点 3 次滑动平均值持续在均值线上下波动, 长期变化稳定。该区域平均波速比明显低于张学民等 (2007) 的研究结果 1.764, 这主要与参与波速比计算的样本数相关, 张学民等 (2007) 研究结果中该区域仅选用 6 次地震事件。因此足够多的样本数据可以提高平均波速比的精度和可信度。

(4) 莱州湾及附近海域 (IV 区)。2002 ~ 2012 年 4 月该子区域共计 297 次有效波速比中, 最低值 1.58, 最高值为 1.81, 平均波速比为 1.708, 标准方差为 0.034 6。如图 3d 所示, 2002 ~ 2009 年波速比滑动平均值变化趋势平缓, 2009 年 4 月后出现密集、起伏较大的波动。相应的在胶东半岛及北部海域尤其是渤海地区 3 级地震活动有序、增强, 2 级微震活动较为频繁, 并发生了 2010 年 5 月 17 日渤海 4.0 级地震。

波速比是反映地壳介质性质的参数, 一般情况下, 假定地球内部介质是理想的弹性体, 其波速比为 1.73, 但在实际情况中即使是在同一构造单元内, 由于地壳深部构造、构成岩石的物理性质和断层分布不同, 波速比也有所差异。分析沂沭带及附近地区平均波速比发现, 莱州湾及附近海域 (IV 区) 平均波速比最低 (1.708), 其次是郯城—高桥地区 (II 区) (1.713) 略低于 I 区 (1.724) 和 III 区 (1.723)。这可能与研究区深部构造及断层运动特性有关。由深部探测结果可以看出, 在郯城—高桥段 (II 区) 地壳层的拗曲变形最强烈, 地壳介质虽有破裂但破裂程度不是很高; 其中、下层地壳内存在不连续的低速体, 且在临沂附近地区上地壳速度偏高 (张碧秀, 汤永安, 1988)。这一区域是现代中小地震最活跃的区段, 也是 1668 年郯城 8.5 级强震的主破裂区。

莱州湾及附近海域 (IV 区) 位于郯庐断裂与燕山—渤海断裂的交汇部位, 现代中小地震集中分布在庙岛群岛和 1948 年 6 级地震震源区及成山角附近海域。胶东半岛的结晶基底由上元古、中元古和下元古代地层构成, 这些古老的基岩明显提高了地壳中部与浅表层的地震波速度 (李志伟等, 2006)。环渤海地区中生代末至早第三纪初, 在 NE 向大型断裂的分割控制下形成多个大型隆起和凹陷区, 地壳上地幔介质在不同深度均存在显著的横向不均匀性 (卢造勋等, 1999)。而孟瞳—

潍坊段 (III 区) 中、下层地壳介质破碎, 说明在形成这一断裂的中生代之前及中生代沉积过程中有过强烈活动, 尚存的破碎使其不易集结能量而活动弱 (满洪敏, 2005); 由图 2 可知, 该区域中小地震多发生在沂沭带西侧的北西向断裂附近, 这一区域的沉积盖层为古生代碳酸岩, 结晶基底为古老的泰山群变质岩, 其地震波速度会有所提高 (王志才等, 2001)。

新沂—宿迁 (I 区) 地壳破裂程度及断层的拗曲变形较其北部断裂明显减弱, 缺失中、下地壳低速体, 地震活动水平偏低。波速比的高低能够反映一定地区的介质的脆韧性转变和横向不均匀性, 沂沭断裂带及附近区域分段平均波速比值的高低同样反映了同一构造单元内各区段特殊地质环境的细节差异。

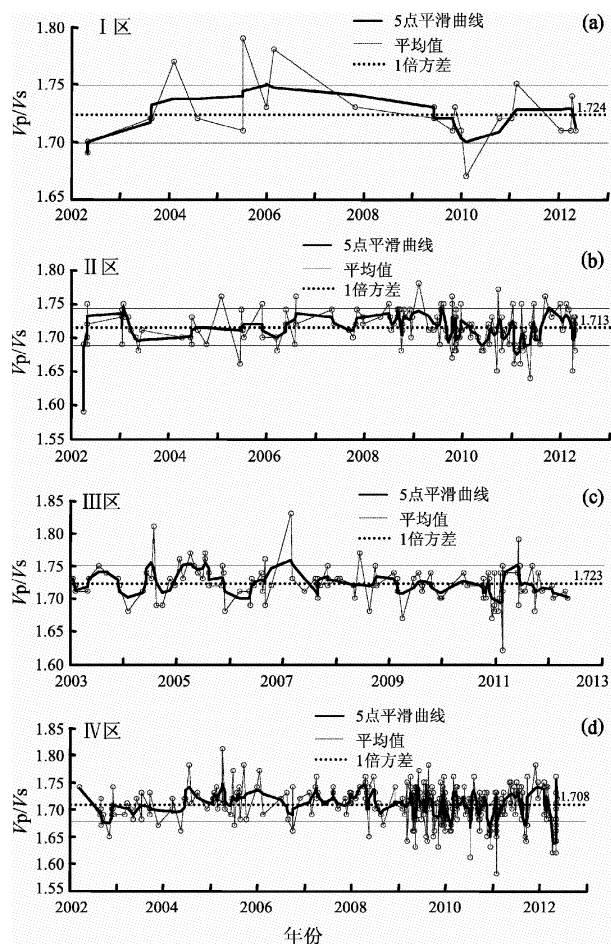


图3 各子区域波速比原始曲线与近均值滑动曲线的叠加对比

Fig. 3 The superposition comparison of the wave velocity ratio original curve and its nearest-mean sliding curve in each sub-regions

在固定研究时段内对沂沭断裂带及附近地区多台波速比按克里格插值做空间扫描,更清晰地反映了各子区域波速比在空间上的差异。如图4可见,沂沭断裂带I、II、III区波速比基本分布在1.69~1.73内,仅安丘附近出现相对波速比高值区,最高波速比1.81。两个较为明显的波速比低值区出现在胶东半岛北部海域,第一个低值区(38.2°~38.6°N, 120.6°~121.0°E),波速比最低值为1.58;第二个低值区(37.7°~38.1°N, 120.7°~121.3°E),近东西向展布,波速比最低值为1.62。这在一定程度上也表征了胶东半岛及附近海域地质构造的复杂性和地下介质的区域性差异。

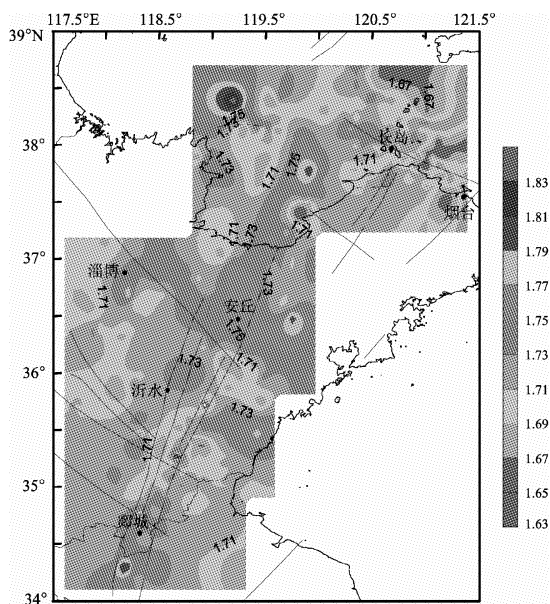


图4 沂沭断裂带及附近地区波速比值空间分布

Fig. 4 Space distribution of wave velocity ratio in Yishu Fault and its adjacent areas

对 hypinverse2000 + hypDD 重新定位后产出的研究区震源深度与波速比关系(图5)进行分析,没有发现两者之间存在明显的相依关系。研究区震源深度分布范围较大,几乎遍布整个地壳,优势震源深度为5~20 km,反映了各子区域中、上地壳的介质状态。分析宿迁—高桥 DSS 剖面得出的沂沭带二维速度结构,在郯城—河阳段中地壳12~20 km处正是高、低速层交接变换的地方。海域地震震源深度主要分布在5~15 km的中、上层地壳内,这种浅表层和地壳上部出现的横向速度异常主要是由环渤海地区造山带和沉积盆地的岩

性组成和构造差异造成的(李志伟等,2006)。

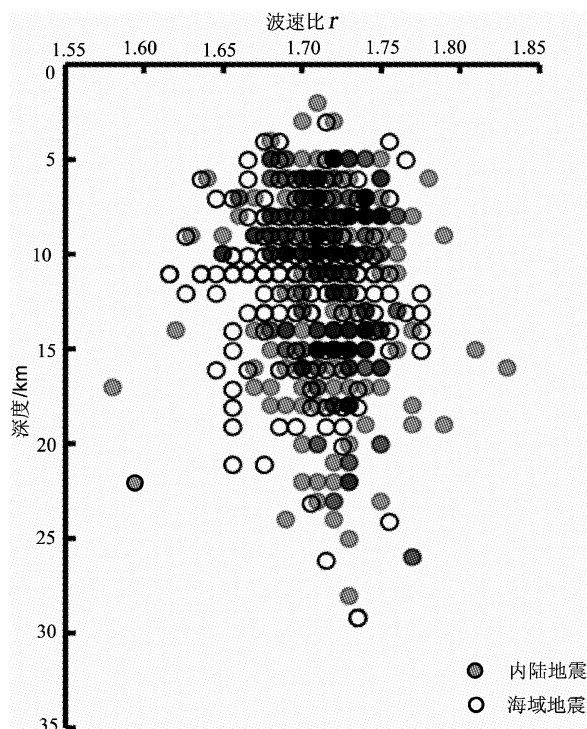


图5 研究区波速比与震源深度的关系

Fig. 5 The relationship between the wave velocity ratio and focal depth in study area

2.3 计算误差分析

蔡静观(2000)和李永莉等(2008)研究认为,计算波速比时产生的剩余标准差 S 主要与参与计算的台站个数和研究区域大小等因素相关。本文计算中,一次地震事件最少使用4个台站的到时资料,其中台站数目最多的达到13个。统计剩余标准差与记录台站的关系(图6)可以看出,随着台站数目的增多,剩余标准差越小,有10个以上台站参与波速比计算的剩余标准差基本都小于等于0.02。因此波速比计算精度与记录台站数目密切相关。对于4~9个记录台站参与波速比计算的标准差,内陆地震精度相对较高,海域一些地震数据标准差较大,拟合精度相对偏低。

从数据精度而言,沂沭断裂带及附近地区是山东区域地震活动最为集中、台站分布密度最大、数据采集精度最高的区域,本文在波速比计算中又将研究区划分为4个现代构造应力场取向有所差异的更小的时空范围进行分析,更能反映出同一构造单元内,不同区段地壳介质的物性差异。根据赵明淳等(2005)的统计及本文计算结果,发

现多台波速比计算中,台站数目越多,数据的线性相关度越高,波速比计算误差就越小。为避免大面积的平均波速比掩盖了孕震信息,空间范围的大小相对时间范围的长短对平均波速比计算结果的影响更大。因此,本文的计算结果具有更高的精确度和可信度。

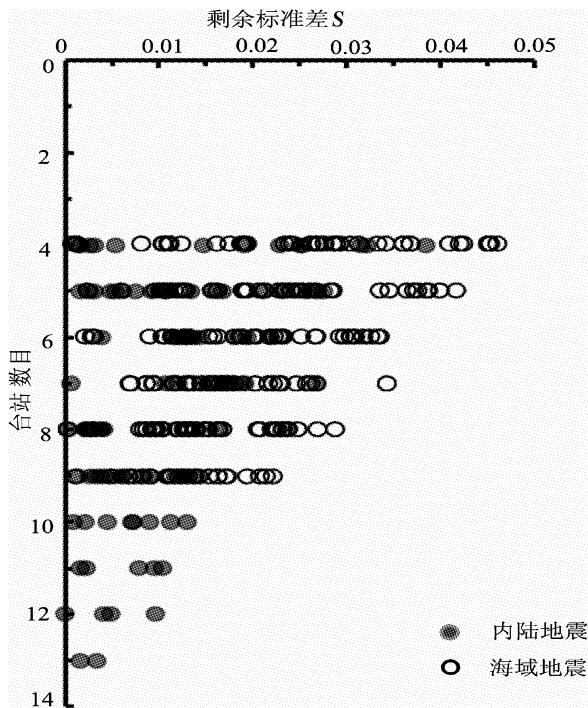


图6 波速比剩余标准差与台站数的关系

Fig. 6 The relationship between the residual standard deviation of wave velocity ratio and the number of stations

3 结论与讨论

(1) 沂沭断裂带及附近地区4个子区域平均波速比为1.714,其中莱州湾及附近海域平均波速比最低为1.708,其次是郯城—高桥小震密集区波速比为1.713,新沂—宿迁段和孟瞳—潍坊段平均波速比相近在1.720左右。在空间分布上胶东半岛北部海域(120.5°E以东地区)波速比明显低于其它区域。据栗生平和傅征祥(1996)、赵明淳等(2005)对华北地区波速比分布的研究结果和赵志新等(2004)对苏鲁地区P波速度结构的研究显示,沂沭断裂带及附近地区平均波速比相对于华北其他地区偏高,与该区域存在高速、高密度的超高压变质岩折返到上地壳与地表有很大的关系。

(2) 沂沭断裂带及附近地区地震震源深度与其波速比没有明显相依关系,震源深度几乎遍布整个地壳,优势深度为5~20 km,反映了各子区域中、上地壳的介质的脆韧性变化和不同地质构造体演化过程不同而呈现出的不同速度结构和波速比特点。

(3) 波速比计算结果的精度与台网的分布密度、空间范围的划分密切相关,参与计算的台站数目越多,波速比计算误差也就越小。在样本充足的条件下,采用与孕震区尺度大致相当的小台网或近台资料,才能更真实地反映区域介质的微动态变化过程。

参考文献:

- 蔡静观. 2000. 波速比计算中得不确定因素和在地震预报中得应用[J]. 地震研究, 23(1): 51-56.
- 冯德益. 1981. 地震波速异常[M]. 北京: 地震出版社, 21-23, 36-37.
- 傅征祥, 程燕. 1988. 北京和张家口地区地壳平均波速比的联合测定[J]. 地震, 8(4): 28-34.
- 嘉世旭, 刘昌铨. 1996. 邢台震源区波速比异常与地震的关系[J]. 地震学报, 39(增刊): 205-215.
- 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[J]. 地震, 24(1): 163-169.
- 李永莉, 毛慧玲, 赵小燕. 2008. 云南地区数字地震波波速比的区域特征[J]. 地震研究, 31(3): 203-208.
- 李志伟, 胥颐, 郝天兆. 2006. 环渤海地区的地震层析成像与地壳上地幔结构[J]. 地球物理学报, 49(3): 797-804.
- 卢造勋, 蒋秀琴, 白云. 1999. 胶辽渤海地区地壳上地幔结构特征与介质的横向非均匀性[J]. 华北地震科学, 2(2): 43-51.
- 陆远忠, 陈章立. 1985. 地震预报的地震学方法[M]. 北京: 地震出版社.
- 满洪敏. 2005. 沂沭断裂带内部的差异活动及成因分析[J]. 华北地震科学, 23(3): 13-21.
- 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社, 78-80.
- 栗生平, 傅征祥. 1996. 华北地区地震带分段波速比平均值的测定[J]. 地震, 16(2): 114-120.
- 王志才, 石荣会, 晁洪太. 2001. 鲁中南隆起区第四纪晚期断裂活动特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 21(4): 95-103.
- 魏光兴, 周翠英, 胡政, 等. 1988. 沂沭断裂带现代构造应力场和震源错动性质[J]. 中国地震, 4(3): 96-106.
- 张小涛, 吕坚, 马广庆, 等. 2006. 九江—瑞昌地震序列的波速比特征研究[J]. 华北地震科学, 24(4): 21-29.
- 张学民, 张天中, 李永红, 等. 2007. 山东地区多台波速比值研究[J]. 地震地质, 29(1): 95-104.
- 张碧秀, 汤永安. 1988. 沂沭断裂带地壳结构特征[J]. 中国地震, 4(3): 16-22.
- 赵明淳, 刁桂苓, 张学民. 2005. 首都圈平均波速比分析[J]. 西北地震学报, 27(3): 246-254.

赵志新,徐纪人,许志琴. 2004. 上地幔三维 s 波速度结构与大别苏鲁超高压变质带俯冲折返机制探讨[J]. 岩石学报, 20(1): 157-164.

Niu F, Silve P G, Daley T M, *et al.* 2008. Preseismic velocity changes ob-

served from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site[J]. *Nature*, 454(7201): 204-209.

Wadati K. 1928. Shallow and deep earthquake [J]. *Geophysical Magazine*, 1: 162-202.

Research on Average Wave Velocity Ration of Segmentation in Yishu Fault and its Adjacent Area

LI Xia, ZHOU Yan-wen, ZHAO Rui, LIU Rui-feng, ZHONG Pu-yu, WANG Feng

(*Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China*)

Abstract

Basing on the observation report of Shandong Provinc Digital Seismic Network from Jan. , 2002 to Apr. , 2012, we calculated the average wave velocity ration and compared temporal and spatial distribution characteristics in Yishu fault zone and its adjacent areas which was divided into 4 sub-region according to multi-station method. The results show that: (1) Average wave velocity ratio of the Tancheng-Gaoqiao and Laizhou bay and their adjacent sea area are slightly lower than those of Mengtong-Weifang and Xinyi-Suqian. The velocity ratio values in Yishu main fault are between 1.69 and 1.73. However it is significantly lower in the northern part of Jiaodong peninsula, and the minimum value is 1.65. (2) The focal depth of moderate and small earthquakes in study area have no obvious dependence with the velocity ratio, and the advantage distribution range of focal depth is from 5 km to 20 km, which reflects there is lateral heterogeneity in the middle and upper crust. (3) In the velocity ratio calculation, the more of the number of stations, the smaller of the calculation error of wave velocity ratio, and the suitable division of the space range could more realistically reflect the changes of the media.

Key words: Yishu Fault Zone; average velocity ratio; residual standard deviation; medium state