

青海东北部地区多台波速比研究*

刘文邦, 王培玲, 马玉虎

(青海省地震局, 青海 西宁 810001)

摘要: 利用青海地震台网的数字化资料, 采用单震多台和达法, 研究了2009年1月至2014年3月青海东北部地区各子区域波速比变化。结果表明: 该时段研究区的平均波速比基本分布在1.685~1.709, 门源—武威地区波速比相对最低, 且有降低趋势。

关键词: 波速比; 多台和达法; 青海东北部

中图分类号: P315.73

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)增刊-0045-05

0 引言

地震波是探测地球内部信息的主要来源和途径, 观测区地壳介质存在各向异性, 导致各地波速也不一致。冯德益等(1981, 1988)总结出在地壳演化过程中介质的物理性状将产生一系列变化, 如出现微破裂、扩容, 地震波通过地壳介质时, 波速也会相应发生变化; 李善邦(1981)认为: 当震源物理状态改变时, 震源区岩石的弹性必然受其影响, 当地震波通过时, 速度发生改变, 产生波速异常, 这是利用波速比研究介质物性的重要依据; 王林瑛等(2011, 2014)分别研究了汶川8.0级地震和芦山7.0级地震序列波速比的变化特征, 通过地震波速提取分析了地壳介质特性的时间变化过程, 为深入认识巨大地震的发震机理和演化过程, 探索预测途径提供了依据; 李霞等(2013)分段研究了沂沭断裂带及附近地区波速比; 黎明晓和张晓东(2004)、傅征祥和程燕(1988)、冯建刚等(2009)分别研究了华北地区、北京及张家口地区、青藏高原东北缘平均波速比。

青海地处青藏高原东北部, 由于海拔高等客观条件的限制导致大部分地区台站分布稀疏。但青海东部地区台站密度较高, 2009年至今的数字地震目录资料比较完善, 本文利用青海地震台网的震相数据, 在对数据进行严格筛选和对研究区分区域的基础上, 利用单震多台和达法对青海东

北部地区各子区域的波速比进行了系统研究。

1 研究区概况

青海东北部地区(98°~103°E, 35°~39°N)地震台站分布较密, 地震监测能力较高, 适合用多台和达法计算波速比。1900年以来该区域发生过12次 $M \geq 6$ 地震, 地震活动强, 1927年甘肃古浪8级地震就发生在祁连山东部的昌马—俄博断裂上, 1990年青海共和盆地发生了7.0级地震, 给当地造成了巨大的人员伤亡和经济损失。

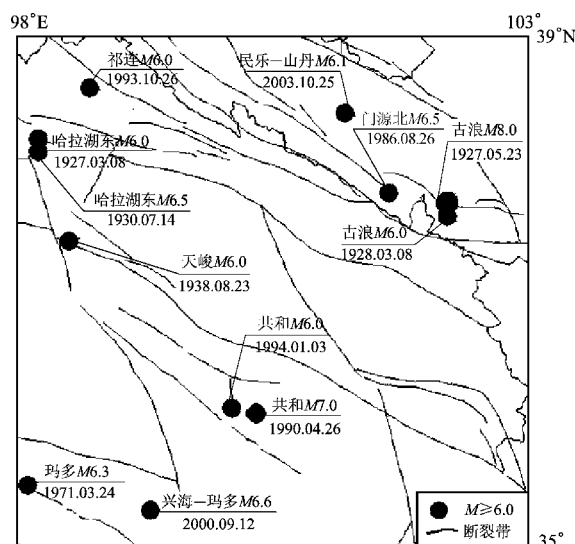


图1 1900年以来研究区 $M \geq 6$ 地震分布
Fig. 1 Distribution of $M \geq 6$ earthquakes in the study area since 1900

* 收稿日期: 2014-08-30.

基金项目: 青海省地震科学基金课题(2011A01)资助.

根据该区域的地震台网布局、地质构造特征及 2009 年以来中小地震空间分布特征对青海东北部进行分区, 分成 1~5 个区域, 如图 2 所示。1 区: 门源—武威, 空间范围为 ($37^{\circ} \sim 38^{\circ}\text{N}$, $101^{\circ} \sim 103^{\circ}\text{E}$); 2 区: 西宁—海东地区, 空间范围为 ($36^{\circ} \sim 37^{\circ}\text{N}$, $101^{\circ} \sim 103^{\circ}\text{E}$); 3 区: 同仁—尖扎, 空间范围为 ($35^{\circ} \sim 36^{\circ}\text{N}$, $101^{\circ} \sim 103^{\circ}\text{E}$); 4 区: 祁连—刚察, 空间范围为 ($37^{\circ} \sim 39^{\circ}\text{N}$, $98^{\circ} \sim 101^{\circ}\text{E}$); 5 区: 兴海—共和, 空间范围为 ($35^{\circ} \sim 37^{\circ}\text{N}$, $98^{\circ} \sim 101^{\circ}\text{E}$)。

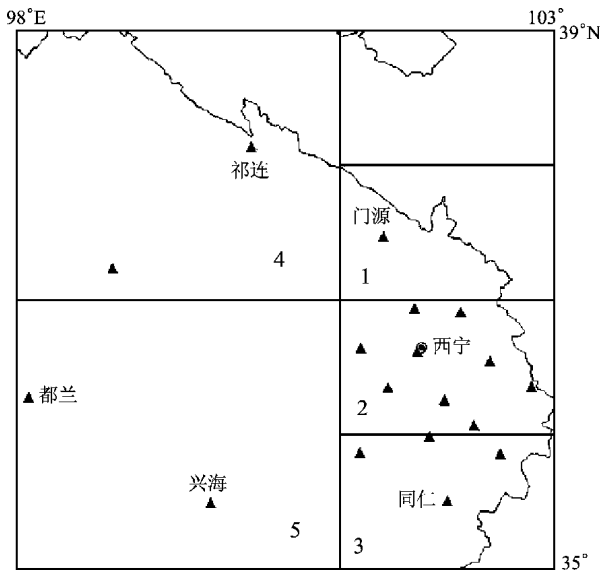


图 2 青海东北部地区台站分布及区域划分
Fig. 2 The station distribution and region division in the northeast of Qinghai area

2 计算方法

本文采用的计算方法是多台和达法。该方法由和达清夫提出, 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 、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 (李善邦, 1981)

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

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

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

由式 (3) 可知, v_p/v_s 为介质的泊松比 σ 的函数, 主要反映的是地壳上层介质泊松比的变化。

根据 P 波走时和 P、S 波到时差的线性关系得到 v_p/v_s 波速比值:

$$\frac{v_p}{v_s} = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)^2}{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i t_{Pi} - \sum_{i=1}^n t_{Pi} \sum_{i=1}^n \Delta t_i}. \quad (4)$$

线型相关系数 R 为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{Pi} - t_P)(\Delta t_i - \Delta t_i)}{\left[\sum_{i=1}^n (t_{Pi} - t_P)^2 \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \Delta t_i)^2 \right]^{1/2}}, \quad (5)$$

以及计算误差为

$$\gamma = \left(\frac{v_p}{v_s} - 1\right)^2 \left\{ \frac{n \sum_{i=1}^n (\delta t'_{Pi})^2}{(n-2) \left[n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Delta t_i\right)^2 \right]} \right\} \quad (6)$$

式中, t_{Pi} 为 P 波走时, t_{Si} 为 S 波走时, $\Delta t_i = t_{Si} - t_{Pi}$, n 为每个地震的到时数据个数, γ 为波速比计算误差, $\delta t'_{Pi} = (t_{Pi} - t_0) - \Delta t_i (v_p/v_s - 1)$ (冯德益, 1981)。

3 资料选取

基于青海省地震台网中心提供的 2009 年 1 月 1 日至 2014 年 3 月 31 日青海地区的观测报告, 按照表 1 给出的限定条件整理了青海东北部地区 1~5 个区域 $M_L \geq 1.5$ 的震相目录。为了保证计算结果的可靠性, 做了如下约定: 1~3 区要求一次地震事件至少有 4 个以上台站同时记录到清晰的直达波到时数据; 4 区、5 区台站密度较 1~3 区低, 考虑到统计分析要求有一定的数据量, 且一次地震事件至少有 3 个以上台站同时记录到清晰的直达波到时数据; 选取 S 波与 P 波到时差、相关系数、波速比误差做了相应的限定。

表 1 青海东北部地区各研究区域空间范围和限定条件
Tab. 1 Spatial range and limited conditions of each study area in northeastern Qinghai

研究区域	空间范围	限定条件
1 区	(37° ~ 38°N, 101° ~ 103°E)	$N \geq 4, R \geq 0.95, \gamma \leq 0.10, \Delta t \leq 23 \text{ s}$
2 区	(36° ~ 37°N, 101° ~ 103°E)	$N \geq 4, R \geq 0.95, \gamma \leq 0.10, \Delta t \leq 23 \text{ s}$
3 区	(35° ~ 36°N, 101° ~ 103°E)	$N \geq 4, R \geq 0.95, \gamma \leq 0.10, \Delta t \leq 23 \text{ s}$
4 区	(37° ~ 39°N, 98° ~ 101°E)	$N \geq 3, R \geq 0.95, \gamma \leq 0.20, \Delta t \leq 23 \text{ s}$
5 区	(35° ~ 37°N, 98° ~ 101°E)	$N \geq 3, R \geq 0.95, \gamma \leq 0.10, \Delta t \leq 23 \text{ s}$

注： N 为台站个数， R 为波速比的相关系数， γ 为波速比的计算误差， $\Delta t = t_s - t_p$ 。

4 计算结果分析

图 3 给出 5 个子区域的波速比计算误差直方图，如图所示，1 区按照限定条件得到计算结果的地震共 100 次，波速比计算误差均小于 0.1；2 区计算得到的地震 184 次，计算误差小于 0.1；3 区地震次数少，入选并得到结果的共 26 次地震，误差均小于 0.1；4 区空间范围较大，但台站密度不高，计算误差调整到 0.2，得到 45 次地震的计算结果；5 区得到调整 78 次地震，波速比计算误差小于 0.1。

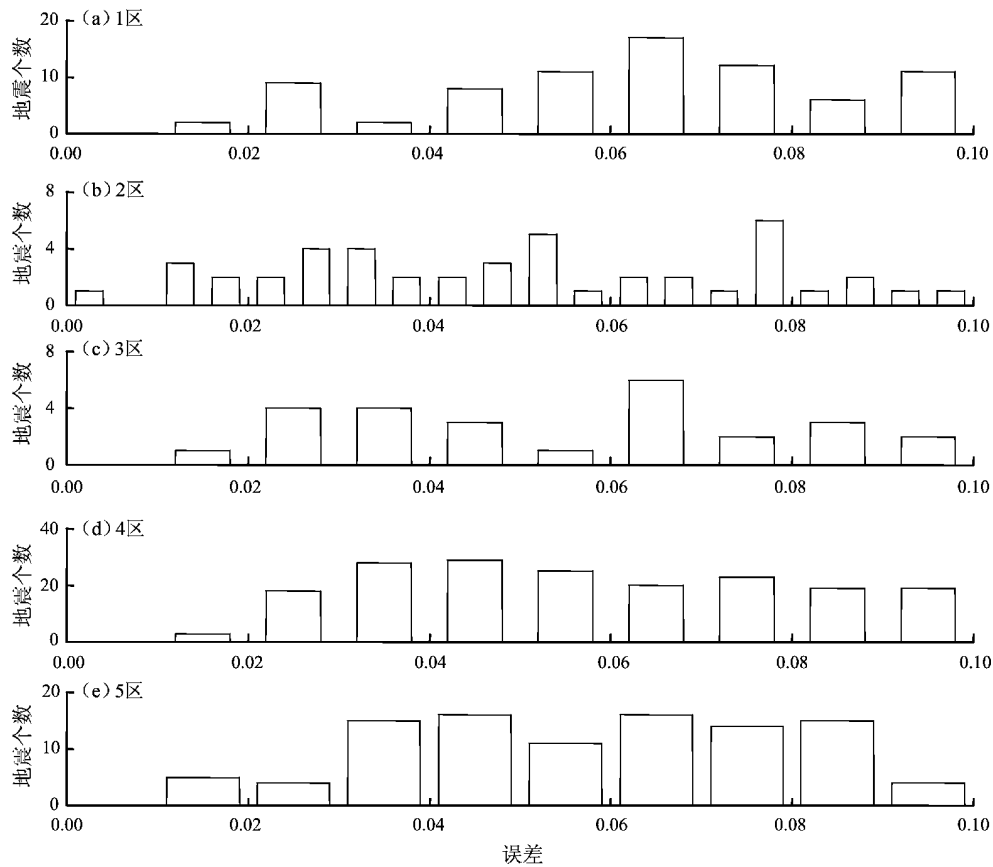


图 3 不同区域波速比计算误差统计

Fig. 3 The statistics of calculation error of wave velocity ratio in different region

使用多台和达法计算研究时段内各子区域的中小地震的波速比时序曲线图 4 所示，各区域波速比原始值曲线波动较大，不利于长趋势的分析，我们对原始数据做了 5 点平滑处理，处理后曲线更加平滑，波速比涨落明显减少。

(1) 门源—武威地区（1 区）：2009 年 1 月至 2014 年 3 月该区域计算得到的 100 次有效波速比的

平均值为 1.685（图 4a），5 点平滑处理后曲线较原始值更光滑，但发现 2012 年前后两个时段波速比值有较明显的趋势性降低变化；2012 年后该区域地震活动明显增强，发生了 2012 年 5 月 11 日甘肃肃南 4.9 级地震和 2013 年 9 月 20 日青海门源 5.1 级地震。为了进一步确定这种变化，我们计算了 2009 年 1 月至 2011 年 12 月的平均波速比为 1.694，2012 年

1 月至 2014 年 3 月平均波速比为 1.677, 前后两个时段的平均波速比相差 0.017, 该区域在 2012 年以后存在波速比低值异常, 这种变化说明该区域地壳应力可能进一步增强, 和期间发生的两次中等地震也有对应关系, 需继续跟踪该值的变化。

(2) 西宁—海东地区 (2 区): 研究时段内该区域计算得到的 184 次波速比平均值为 1.696 (图 4b), 波速比的 5 点平滑曲线围绕平均值上下波动, 无长趋势变化。

(3) 同仁—尖扎地区 (3 区): 该地区地震较少, 研究时段内共计算得到 26 次地震的波速比, 平均值为 1.692 (图 4c), 无长趋势异常变化。

(4) 祁连—刚察地区 (4 区), 该区域所选空间范围较大, 但台站密度不高, 在计算波速比时误差限定调整为 0.2, 共得到 45 次地震的结果,

平均波速比为 1.692 (图 4d), 时间变化曲线上看 2011 年波速比值要高一些, 但整个时间段并无趋势变化, 异常不明显。

(5) 兴海—共和地区 (5 区), 该区域和 4 区的空间范围大小一致, 地震分布较集中, 主要分布在鄂拉山断裂和昆中断裂交汇部位, 也是都兰县和兴海县的交汇地区。计算得到的 78 次地震的平均波速比值为 1.709 (图 4e), 这可能是所选择地震分布更集中, 波速比值的 5 点平滑曲线变化幅度也最小, 最稳定。

5 结论与讨论

本文所选的区域为地震监测能力较好的青海东北部地区。根据该区域内地震台网布局、地质

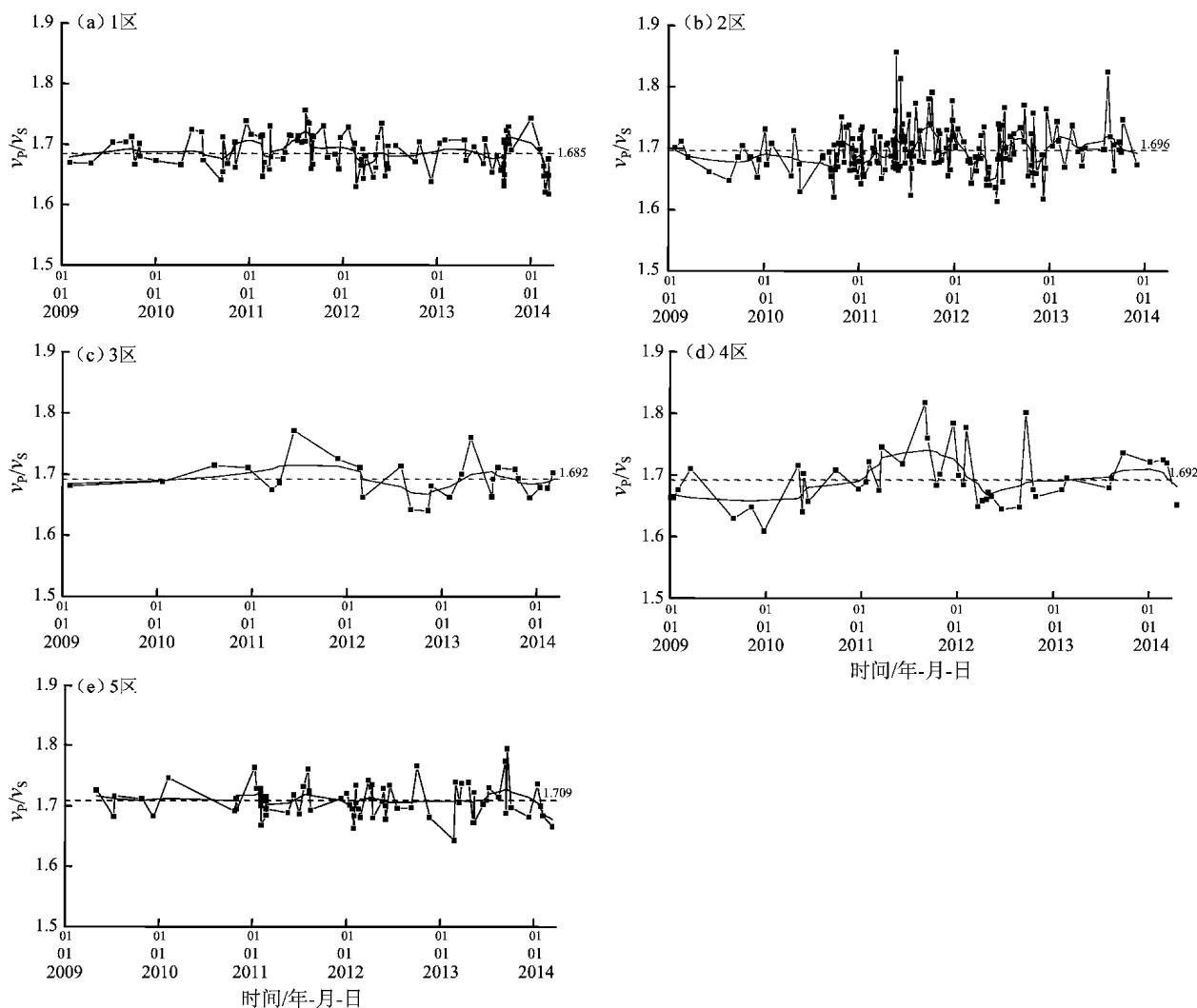


图 4 各区波速比随时间的变化

Fig. 4 Curves of wave velocity ratio changed with time in each region

构造特征、2009年以来中小地震空间分布特征分成了1~5个子区域，所得到的主要的研究结果如下：

(1) 研究区在研究时段内满足单震多台波速比计算限定条件的地震共433次，参与计算的数据有4个台以上记录到清晰的直达波占80%以上，误差分析也表明数据是可靠的。

(2) 1~5各个子区域的平均波速比值分别为1.685、1.696、1.692、1.692和1.709，门源—武威地区(1区)波速比相对最低。该区域波速比的5点平滑曲线在2012年前后两个时段波速比值有降低的趋势，2009年1月至2011年12月的平均波速比为1.694，2012年1月至2014年3月平均波速比为1.677，前后两个时段的平均波速比相差0.017，该区域的波速比出现低值异常变化。

本文计算使用了王林瑛研究员、李艳娥编写

的波速比程序，特此致谢。

参考文献：

- 冯德益. 1988. 地震波理论和应用[M]. 北京：地震出版社.
- 冯德益. 1981. 地震波速异常[M]. 北京：地震出版社.
- 冯建刚, 代伟, 董治平, 等. 2009. 青藏高原东北缘平均波速比的测定和研究[J]. 西北地震学报, 31(1): 61-65.
- 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.
- 黎明晓, 张晓东. 2004. 应用多站法测定华北地区地壳的平均波速比[J]. 地震, 24(1): 163-169.
- 李善邦. 1981. 中国地震[M]. 北京：地震出版社, 522.
- 李霞, 周彦文, 赵瑞, 等. 2013. 沂沭断裂带及附近地区分段平均波速比研究[J]. 地震研究, 36(2): 148-154.
- 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[J]. 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[J]. 地震学报, 36(1): 42-58.

Research on Multi-station Wave Velocity Ratio in the Northeast of Qinghai Area

LIU Wen-bang, WANG Pei-ling, MA Yu-hu

(Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract

Basing on digital data in Qinghai Seismic Network, we studied the variation of wave velocity ratio of each subarea in eastern Qinghai between Jan., 2009 to Mar., 2014 by multi-station. The results show as follows: the average wave velocity ratio was between 1.685 and 1.709 in the study area during this period, and the mean value of wave velocity ratio was the lowest and had a decreasing trend in Menyuan-Wuwei area.

Key words: wave velocity ratio; multi-station method; the northeast of Qinghai