

曹凤娟,郭晓燕,李梦莹,等.辽宁地区波速比分布特征及构造意义[J].地震工程学报,2021,43(2):264-271.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.264
CAO Fengjuan, GUO Xiaoyan, LI Mengying, et al. Distributions Characteristics of Wave Velocity Ratio and Associated Tectonic Significance in Liaoning Area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(2): 264-271. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844. 2021.02.264

辽宁地区波速比分布特征及构造意义

曹凤娟, 郭晓燕, 李梦莹, 贾丽华, 王松阳

(辽宁省地震局, 辽宁 沈阳 110034)

摘要:利用辽宁数字台网 2001 年以来的观测报告,采用单台和达法计算辽宁测震台网 34 个台站的平均波速比,重点分析辽宁地区波速比的空间分布特征。结果显示,辽宁地区的波速比空间分布呈横向不均匀性,下辽河盆地的波速比平均值低于整个辽宁地区波速比的均值,而辽西隆起和辽东隆起区的波速比却明显高于下辽河盆地的波速比和辽宁地区的均值。研究也发现,辽宁地区 5 级以上地震多发生在波速比低值区或高低值过渡区。计算所得的各区平均波速比对以后辽宁地区波速比值的变化分析有一定的参考作用。

关键词:波速比;介质特性;断裂带;过渡区

中图分类号: P315.3⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)02-0264-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.264

Distributions Characteristics of Wave Velocity Ratio and Associated Tectonic Significance in Liaoning Area

CAO Fengjuan, GUO Xiaoyan, LI Mengying, JIA Lihua, WANG Songyang

(Liaoning Earthquake Agency, Shenyang 110034, Liaoning, China)

Abstract: Based on the observation data from Liaoning Digital Seismic Network since 2001, we used the Wadati method of single station to calculate the average wave velocity ratio of 34 stations in Liaoning Seismic Network, and focused on the spatial distribution characteristics of wave velocity ratio in Liaoning area. The results showed that the spatial distribution of wave velocity ratio in Liaoning area has laterally heterogeneities. The average wave velocity ratio in Xialiaohe basin is lower than that in the whole Liaoning area, while the wave velocity ratio in western and eastern Liaoning is significantly higher than that in Xialiaohe basin and the average value of Liaoning area. It is also found that $M \geq 5.0$ earthquakes in Liaoning area mostly occurred in the low-value zone of wave velocity ratio or the transition area of high to low value. The calculated average wave velocity ratio of each region has a certain reference value for future analysis of wave velocity ratio changes in Liaoning area.

Keywords: wave velocity ratio; media characteristics; fault zone; transition area

收稿日期: 2020-01-15

基金项目: 辽宁省地震局与中国地震局地震预测研究所局所合作项目(2018IEF010203)

第一作者简介: 曹凤娟(1970-),女,高级工程师,主要从事地震学研究工作。E-mail: cao99@sina.com。

0 引言

地震活动与区域构造和地壳活动状况密切相关,地震波速或波速比可以反映其断层或地壳的活动情况。张洪艳等^[1]在研究吉林地区波速比分布特征与地震活动的关系时发现,在波速比高值区和高、低值过渡区为地震易发地带;张学民等^[2]研究华北地区的波速比时发现在强震区的波速比总体上高于弱震区;李永莉等^[3]研究也发现云南地区波速比空间分布具有区域性、非均匀的特征;刘琼林等^[4]研究华北克拉通中西部地区地壳厚度与波速比中也发现,由于中西部地下介质的岩性和密度不同,导致山区和盆地的地壳厚度和平均波速比也有所不同。

辽宁省属于华北断块区,其中郯庐地震带纵贯辽宁南北。根据地层、岩石、构造及地球物理特点,辽宁可分为 3 个次级断块,即辽东断块隆起,辽西断块隆起和下辽河断块拗陷。辽东断隆是一个古老的隆起带,前震旦系变质岩系在区内有着广泛的分布;辽西断块隆起古老变质岩系和古生代地层出露很少,而中生代火山岩却广泛分布,下辽河断陷为中、新生代断陷盆地,经历了先断陷后拗陷 2 个构造阶

段^[5]。总体上看,辽宁地区属于华北克拉通构造的一部分,由于该区域受到华北克拉通活化的影响,内部新构造运动很活跃,存在着多条活动断裂,如大洋河—康家岭断裂和金州断裂,因此辽宁地区(特别是辽东断块隆起区)历史上发生过多次 5 级以上地震。

监测地下介质性质的时空变化一直是地震预测预报研究的重要思路和具有潜力的研究方向。通过地震波速提取和监控地下深部介质物性的变化信息,对于中强震的物理参数预测和地点判定无疑是重要的。以往对波速比的研究多以对某一固定区域进行时间变化分析,寻找震前异常。本文则是利用辽宁数字地震台网 34 个台站的观测报告,采用和达法计算 2001 年以来辽宁地区的波速比,探讨波速比的区域分布特征,同时结合地质构造环境,进一步探讨辽宁地区地震活动与波速比和地下介质的关系。

1 资料与方法

辽宁数字地震台网于 1999 年 6 月开始观测,目前已从原有的 16 个增加到 34 个(图 1),仪器都升级为宽频带地震仪,台网监测能力大幅度提高,可以

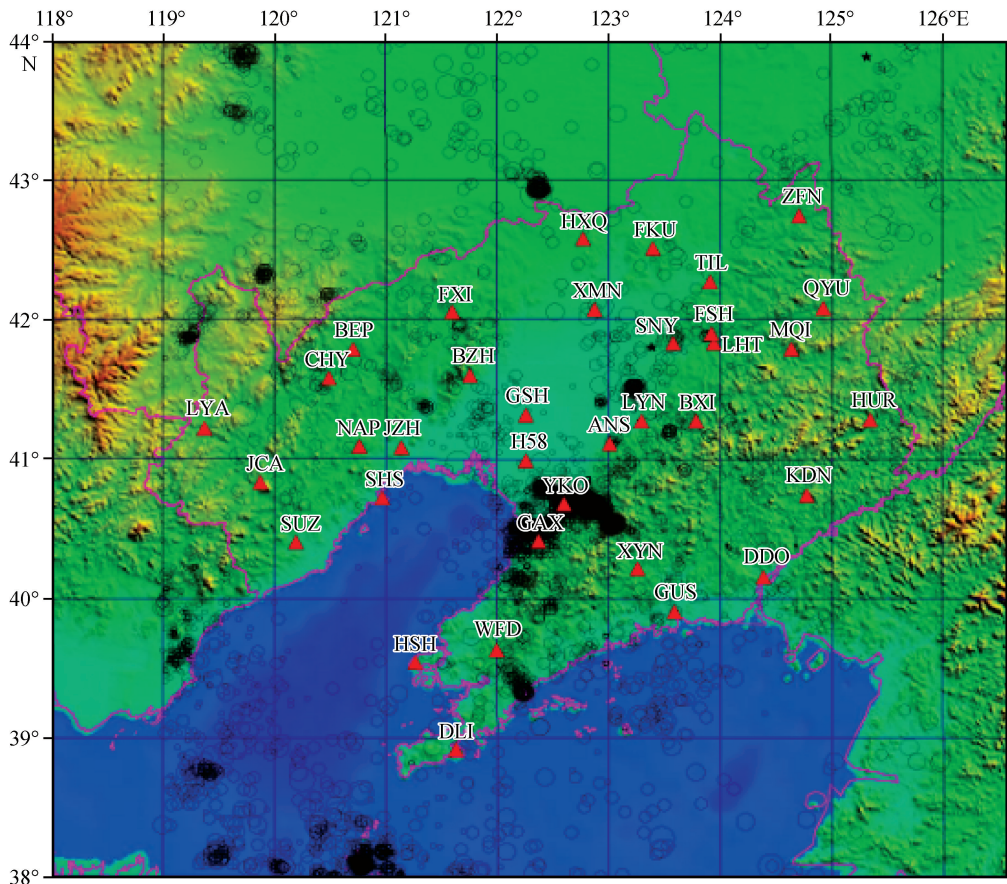


图 1 辽宁测震台网台站位置和 2001 年以来 1 级以上地震分布

Fig.1 Location of stations in Liaoning seismological network and distribution of earthquakes with $M_L \geq 1.0$ since 2001

控制全省大部分地区 1.0 级以上地震,边缘及邻近海域可监测到 1.5 级以上地震。本文利用辽宁地震台网 2001 年以来的震相观测报告,用单台和达法计算了辽宁地区的波速比。

根据 4 个以上数字地震台记录到的清晰直达波 Pg、Sg 震相的到时 T_P 、 T_S ,用最小二乘法计算波速比 γ 和相关系数 R :

$$\gamma = \frac{v_P}{v_S} = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta t_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (\Delta t_i T_{Pi}) - \sum_{i=1}^n T_{Pi} \sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad (1)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{Pi} - \bar{T_P})(\Delta t_i - \bar{\Delta t_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{Pi} - \bar{T_P})^2 \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \bar{\Delta t_i})^2}} \quad (2)$$

式中: T_{Pi} 为 P 波走时; $\Delta t_i = T_{Si} - T_{Pi}$,其中 T_{Si} 为 S 波走时, $i=1,2,3,\dots,n$, n 为每次地震到时数据的个数;相关系数 R 主要用来度量纵波到时与纵横波到时差之间的线性关系。

通常要求直达波到时差 Δt_i 不超过 23 s,最好 12 s 以内,相关系数 R 大于 0.95,最好 0.98 以上,拟合误差小于 0.05,台站个数大于 4。经过严格的数据筛选,最终满足计算精度参与计算的地震事件(大于 1.0 级)有 17 934 个。

2 结果分析

2.1 波速比空间变化特征

表 1 为辽宁地区测震台网波速比计算结果。由表 1 可知,辽宁测震台网 34 个台站中 16 台(九五数字化台站)的波速比数据起止时间为 2001 年,34 个台站的波速比均值范围 1.666 1~1.726 3,误差范围为 0.013 0~0.039 2,相关系数除高升(GSH)、西丰(XFN)、首山(SHS)和锦州(JZH)外,均大于 0.99。总体来看,波速比、误差和相关系数的均值分别为 1.697 8、0.027 8 和 0.994 6,都较好地满足了计算精度。图中绿色区域代表波速比低于均值,红色区域代表波速比高于均值。

由波速比的物理意义可知,表 1 中 34 个测震台站的平均波速比代表了震源至台站周围介质的平均波速比,不同的区域地质构造特征其波速比也应有不同。为此,根据辽宁地区新构造运动分区结果^[6],辽宁境内主要有三个主要新构造运动分区,即燕辽上升隆起区Ⅱ、松辽一下辽河—辽东湾沉降区Ⅲ、辽东—张广才岭上升隆起区Ⅳ。在此将辽宁测

震台站也分成三个区来讨论辽宁地区波速比的空间分布特征,即辽西隆起、下辽河盆地和辽东隆起(表 1、图 2)。由表 1 和图 2 可见,下辽河盆地的波速比平均值(1.690 5)低于整个辽宁地区波速比的均值(1.697 8),而辽西隆起的波速比(1.701 2)和辽东隆起区的波速比(1.703 3)却明显高于下辽河盆地的波速比(1.690 5)和辽宁地区的均值(1.697 8),空间分布呈明显的横向不均匀性。该结果虽然与贾丽华等^[5,7]利用远震 P 波接收函数 H-Kappa 叠加方法获得的各台站下方的波速比在数值上平均偏小 0.067,但是整体空间分布特征基本相符。

从图 2 中可以看出,波速比在辽西隆起区整体偏高(大于 1.70),低值主要集中在北票—朝阳断裂附近,尤其 CHY 台附近,波速比只有 1.666 1(表 1)。而下辽河盆地地区的波速比值整体偏低,大部分小于 1.69,只有 GAX 台的波速比大于 1.71,低值集中在 FSH 和 LHT 台附近,该区位于密山—敦化和依兰伊通断裂交汇处。辽东隆起区的波速比空间分布较不均匀,低值主要集中在南部大洋河断裂附近,即 DDO 台和 XYN 台(1.67)台附近。而北部的波速比整体偏高,尤其 QYU 台附近,波速比值达到 1.73(表 1)。从北到南,辽东隆起区波速比值变化范围达到 0.06。在 $40^\circ \sim 42^\circ \text{N}$ 之间,辽宁地区的波速比分布与研究区内断裂带及地质构造地貌形态表现出良好的相关性,即由东到西呈现明显的横向不均匀性,空间分布表现为相对的高-低-高,与该区域的新构造分区对应较好:即辽东隆起—下辽河盆地—辽西隆起。此外波速比的空间分布与该区域的地形地貌吻合的也较好,即山区隆起(波速比高)—盆地坳陷(波速比低)—山区隆起(波速比高)(图 1)。辽宁及邻区背景噪声面波群速度结构研究结果显示^[8]:辽宁地区地壳及上地幔存在明显的横向不均匀性。短周期群速度分布与研究区内断裂带及地质构造地貌形态表现出良好的相关性,其中 8~15 s 周期内群速度分布特征与盆地坳陷、山区隆起对应性较好,呈“两垒高,一堑低”的群速度分布特点,基本与地质构造相吻合。本文的研究结果与之相类似。

2.2 波速比与易震区

地震易震区的划分主要从地震地质和地质构造的角度,结合地震学方法综合分析^[9]。辽宁省($119^\circ \sim 126^\circ \text{E}$, $39^\circ \sim 43^\circ \text{N}$)位于郯庐断裂的北段,是东北地区地震活动最强烈的省份,自公元 419 年朝阳 5½ 级地震发生至今,共记录到 $M_s \geq 5.0$ 地震 30 次。辽宁地区地震的空间分布比较不均匀,省内中强地震明显

受到郯庐断裂带、金州断裂、大洋河断裂、北票—朝阳断裂等的控制,即地震活动与构造的相关性较明显^[10]。由辽宁地区的历史地震分布和波速比变化空间分布图 3 可见,历史上发生过 5 级以上地震(表 2)的区域大都位于波速比低值区域及其附近。1975 年 2 月 4 日海城 7.3 和 1999 年 11 月 29 日岫岩 5.4 级地震就发生在在 XYN 台至 YKO 台的低值区,2013 年 1 月 23 日灯塔 5.1 级和 1765 年沈阳 5¼ 级地震发生在 LYN 台和 SNY 台低值区,1698 年义县 5.0 级地震发生 CHY 台低值区。波速比的高低可以反映区域介质的脆韧性变化,在海城—岫岩,朝阳—北票附近的低值与卢造勋等^[11]通过内蒙古东乌珠穆沁旗—辽

宁东沟地学断面的研究结果相符(即发现在海城地震区一带,存在壳内低速高导、低密度、高热流等一系列重大地球物理异常,在空间上与震源区存在相当好的一致关系),海城地震(包括前震、余震)震源一般均位于该区低速-高导层上方的脆性地壳内,从下部传递应力角度来看,无疑对地震的孕育和发生提供了力源条件^[12]。此外,辽宁地区地壳上地幔速度地震层析成像结果也发现,海城—营口地区、朝阳—义县地区存在明显的壳内速度低速区^[13]。这与王亮等^[14]利用层析成像获得的结果相符,即海城地区地震主要发生在波速比较低的区域,但也有北西段的部分地震发生在高低波速比交界地区。

表 1 辽宁地震台网各台波速比计算结果

Table 1 Results of wave velocity ratio of each station in Liaoning seismic network							
区域	台站	起止时间	波速比	标准差 S	相关系数 R	地震数 N	分区均值
下辽河盆地	YKO	2001—2018	1.689 1	0.021 8	0.996 9	3 524	$\gamma=1.690\ 5$ $S=0.025\ 7$ $R=0.996\ 1$
	GAX	2008—2018	1.724 2	0.029 3	0.995 0	1 664	
	H58	2009—2018	1.692 6	0.029 8	0.994 9	172	
	* GSH	2014—2018	1.713 3	0.027 3	0.974 7	22	
	ANS	2001—2018	1.691 1	0.023 5	0.996 0	1 622	
	LYN	2001—2018	1.686 1	0.027 7	0.993 7	438	
	XMN	2001—2018	1.690 0	0.031 1	0.994 6	547	
	SNY	2001—2018	1.681 0	0.028 3	0.998 1	1 206	
	FSH	2001—2018	1.680 4	0.021 9	0.998 2	593	
	LHT	2009—2018	1.680 7	0.013 0	0.999 0	126	
	FKU	2001—2018	1.687 3	0.029 5	0.996 3	279	
	TIL	2009—2018	1.696 9	0.027 9	0.996 6	172	
	HXQ	2009—2018	1.686 0	0.024 4	0.993 3	97	
辽东隆起	XYN	2001—2018	1.6733	0.0296	0.993 9	2 308	$\gamma=1.703\ 3$ $S=0.029\ 5$ $R=0.993\ 6$
	HSH	2001—2018	1.699 6	0.030 2	0.994 5	131	
	WFD	2008—2018	1.712 7	0.024 8	0.994 7	627	
	* DLI	2003—2018	1.679 3	0.022 4	0.995 0	8	
	GUS	2008—2018	1.709 6	0.029 7	0.991 4	489	
	DDO	2001—2018	1.686 4	0.026 6	0.993 1	215	
	KDN	2008—2018	1.712 2	0.031 4	0.993 0	105	
	BXI	2001—2018	1.692 2	0.028 8	0.994 0	1 068	
	* HUR	2014—2018	1.705 5	0.027 6	0.992 0	9	
	XFN	2009—2018	1.702 5	0.039 2	0.989 6	30	
	MQI	2008—2018	1.718 3	0.031 5	0.995 1	156	
	QYU	2009—2018	1.726 1	0.023 4	0.996 4	121	
辽西隆起	LYA	2010—2018	1.726 3	0.026 4	0.993 3	42	$\gamma=1.701\ 2$ $S=0.028\ 4$ $R=0.993\ 8$
	JCA	2010—2018	1.714 1	0.024 8	0.997 7	60	
	CHY	2001—2018	1.666 1	0.030 0	0.995 9	156	
	FXI	2001—2018	1.699 9	0.016 5	0.998 0	458	
	SHS	2008—2018	1.708 0	0.032 8	0.989 4	149	
	NAP	2009—2018	1.716 0	0.028 6	0.992 4	44	
	BEP	2001—2018	1.684 1	0.035 5	0.994 4	113	
	JZH	2001—2018	1.694 1	0.032 6	0.989 9	305	
	BZH	2001—2018	1.702 6	0.028 7	0.993 2	879	
平均			1.697 8	0.027 8	0.994 6		

注:绿色区域为波速比低于均值 1.697 8;红色区域为波速比高于均值 1.697 8。

* 号标注的台站(GSH、DLI、HUR)由于地震个数少于 30,故不参与计算与绘图。

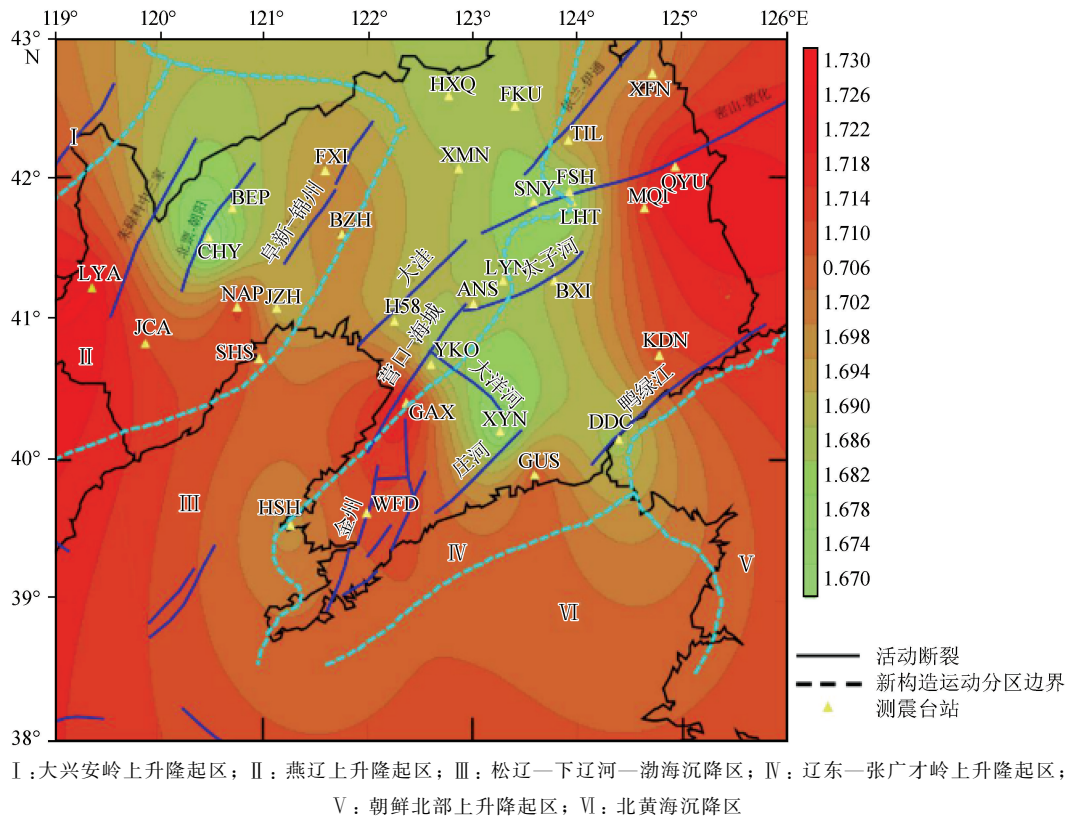


图 2 辽宁地区测震台站及新构造分区(据万波)和主要活动断裂

Fig.2 Seismological stations, Neotectonic division (according to Wanbo) and main active faults in Liaoning area

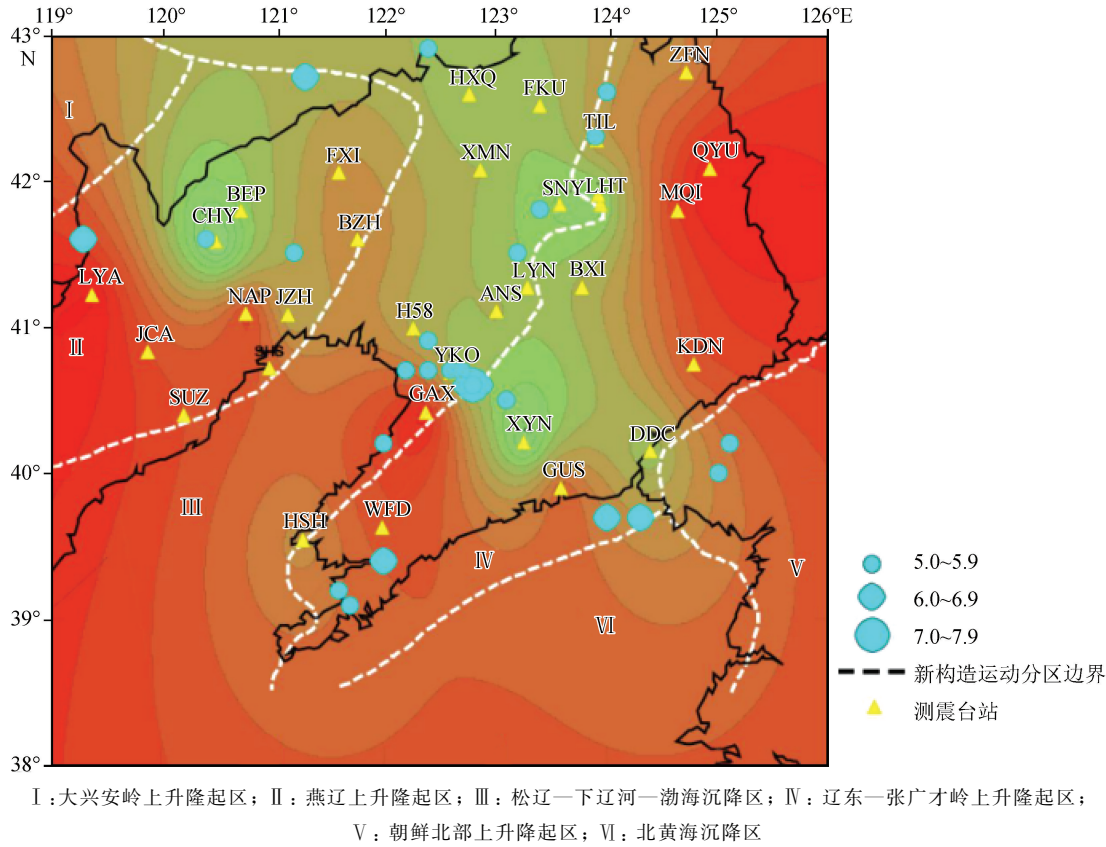


图 3 辽宁地区测震台站和历史地震空间分布及新构造分区(据万波)

Fig.3 Spatial distribution of seismological stations and historical earthquakes in Liaoning area and Neotectonic division (according to Wanbo)

表 2 辽宁地区 (119°~126°E,39°~43°N)5 级以上地震

Table 2 The $M_s \geq 5.0$ earquakes in Liaoning area(119°—126°E,39°—43°N)					
编号	年-月-日	纬度/(°)	经度/(°)	震级/ M_s	参考地点
1	419-00-00	41.6	120.4	5.5	朝阳
2	1290-09-27	41.6	119.3	6.7	内蒙宁城
3	1596-00-00	42.6	124.0	5.0	开原
4	1698-00-00	41.5	121.2	5.0	义县
5	1765-03-15	41.8	123.4	5.5	沈阳
6	1775-00-00	42.3	123.9	5.5	铁岭
7	1855-12-11	39.2	121.6	5.5	金县
8	1856-04-10	39.1	121.7	5.2	金县
9	1859-09-19	40.7	122.2	5.2	营口
10	1861-07-19	39.4	122.0	6.0	金县
11	1885-04-07	40.7	122.2	5.0	营口
12	1917-05-28	39.7	124.0	6.1	鸭绿江口
13	1923-08-11	40.0	125.0	5.0	中朝边界
14	1940-01-19	42.7	121.3	6.0	内蒙通辽
15	1940-08-05	40.2	122.0	5.7	熊岳
16	1944-12-19	39.7	124.3	6.7	鸭绿江口
17	1975-02-04	40.7	122.7	5.5	海城
18	1975-02-04	40.6	122.8	7.3	海城
19	1975-02-04	40.6	122.9	5.1	海城
20	1975-02-06	40.6	122.9	5.2	海城
21	1975-02-06	40.9	122.4	5.4	海城
22	1975-02-15	40.6	122.7	5.4	海城
23	1975-02-16	40.6	122.8	5.4	海城
24	1978-05-18	40.7	122.6	5.9	营口
25	1978-05-20	40.7	122.4	5.2	营口
26	1980-01-08	40.2	125.1	5.7	朝鲜天摩山
27	1999-11-29	40.5	123.1	5.4	岫岩
28	2000-01-12	40.5	123.1	5.1	岫岩
29	2013-01-23	41.5	123.2	5.1	灯塔
30	2013-04-22	42.9	122.4	5.3	内蒙科尔沁

有些历史地震(1900 年前)则位于波速比高值与低值梯度转换地带,如鸭绿江口(DDO 和 GUS 台之间)、辽南(DLI 和 WFD 台之间),以及辽西和辽北等地的地震,且这些地震的震级大都超过 6 级。总体来看,波速比低值区或者高低梯度转化带附近为 5 级以上地震的易发区,尤其集中分布于松辽一下辽河—渤海沉降区和辽东—张广才岭上升隆起区的过渡地带(图 3 中Ⅲ区与Ⅴ区分界线附近),即郯庐断裂沈阳—渤海段。这可能与地质构造环境即地质构造所形成的断裂带两侧的介质特性差异有关,由于两侧构造单元的不同物理性质,更易孕育地震^[11]。海城地震区位于地壳与上地幔介质横向最不均匀的地段,其西侧的下辽河地区和东侧的辽东地区,地壳特征有显著差异:西侧具新生代裂谷特征,有巨厚的新生代沉积及深大断裂,且有从深断裂上溢的镁铁质岩,地壳厚度较薄;而其东侧不具备这些特征^[11]。因此导致在过渡区即海城地震区易于出现明显的新构造运动,构成新构造差异运动较强

烈的地段。

3 结论与讨论

本文采用单台和达法计算了辽宁测震台网 34 个台站的平均波速比,重点分析了辽宁地区波速比的空间分布特征。结果显示,辽宁地区的波速比空间分布呈横向不均匀性:下辽河盆地的波速比平均值低于整个辽宁地区波速比的均值,而辽西隆起和辽东隆起区的波速比却明显高于下辽河盆地的波速比和辽宁地区的均值。研究也发现,辽宁地区 5 级以上地震多发生在波速比低值区或高低值过渡区。

波速比是反映地壳介质性质的参数,其不确定因素主要由介质的横向不均匀性和计算方法的局限性造成的。非介质原因造成的波速比不确定因素中,首先考虑震源深度的影响,据 Nicholson^[15]的研究发现,波速比随震源深度的增加而减小,但蔡静观^[16]的研究认为当 $1.50 < v_P/v_S < 1.90$ 时,93% 的地震震源深度和波速比无明显的关系。而本文的波

速比范围介于 1.666 1~1.726 3 间,因此可以认为震源深度对本文波速比计算结果的影响不大。其次,有关震相辨别误差和时间服务等的影响,在“十五”数字台网建成后,所得资料均可以满足计算要求^[17]。此外为了尽量减少介质横向不均匀性和计算方法局限性的影响,本文最终选择参与计算的波速比均满足相关系数大于 0.98,87%的台站(27 个台)的相关系数大于 0.99。拟合误差均小于 0.040,其中误差介于 0.010~0.020 间的有 6%(2 个台),0.021~0.030 间的有 42%(13 个台),0.031~0.040 间的有 52%(16 个台)。由此可见本文计算结果均满足波速比计算方法中对相关系数和拟合误差的要求(相关系数大于 0.95,拟合误差小于 0.05),因此结论的可信度相对较高。

波速比是地震学中最重要运动学参数之一,它与地震波传播路径上介质的物理性状密切相关,反映了岩石受应力作用以及其他物理条件改变的影响^[18]。岩石物理和实验研究表明,波速比与岩石的岩性之间存在密切关系,岩石微观结构如裂隙、孔隙的形状、密度以及岩石含水的饱和程度等都对波速比起着重要影响^[19-25]。卢造勋等^[11]对内蒙古东乌珠穆沁旗—辽宁东沟地学断面的研究中发现:辽东台隆位于辽东古陆的主体部位,为长期处于隆起状态的克拉通地块,太古宇、下元古界的麻粒岩、角闪岩、绿片岩相岩广泛出露地表,沉积盖层不发育,壳内发育 I、S 型花岗岩,下辽河中、新生代裂谷是在两个古陆拼接成的克拉通基底上,于中、新生拉张裂开形成的断陷盆地,地震纵波速度值较低(3.0 km/s),存在速度逆转层和低密度层。密度变化最显著的地段分布在辽河平原与辽东半岛的过渡地带,在此中层地壳上部存在明显的低密度层^[12]。该层由于塑性较大,易于传递应力,在受到区域构造应力场的作用后,在其附近,特别是邻近低速层之上的脆性地壳,更易于应力集中,岩石更易于破裂,从而形成地震易于孕育和发生的层位^[11]。由此可见,由于辽东隆起区的岩石密度(花岗岩)大于下辽河盆地区(存在低密度层),导致下辽河盆地区域的波速比值相对较低,进而导致辽宁境内 5 级以上地震集中分布于松辽—下辽河—渤海沉降区和辽东—张广才岭上升隆起区的过渡地带。

参考文献(References)

- [1] 张洪艳,张广伟,王晓山,等.吉林地区波速比分布特征及构造意义[J].地震地质,2015,37(3):829-839.

- ZHANG Hongyan, ZHANG Guangwei, WANG Xiaoshan, et al. Regional Characteristics of Wave Velocity Ratio in Jilin Area and Their Tectonic Implications[J]. Seismology and Geology, 2015, 37(3): 829-839.
- [2] 张学民,刁桂苓,束沛德.鄂尔多斯块体及其东南缘剪切波速度结构与波速比研究[J].中国地震,2004,20(1):53-63.
ZHANG Xuemin, DIAO Guiling, SHU Peiyi. Study on Shear Wave Velocity Structure and Velocity Ratio under the Ordos Plate and Its Southeastern Marginal Areas[J]. Earthquake Research in China, 2004, 20(1): 53-63.
- [3] 李永莉,毛慧玲,赵小艳,等.云南地区数字地震波波速比的区域特征[J].地震研究,2008,31(3):203-208.
LI Yongli, MAO Huiling, ZHAO Xiaoyan, et al. Regional Characteristics of Digital Seismic Wave Velocity Ratio in Yunnan [J]. Journal of Seismological Research, 2008, 31(3): 203-208.
- [4] 刘琼林,王椿镛,姚志祥,等.华北克拉通中西部地区地壳厚度与波速比研究[J].地球物理学报,2011,54(9):2213-2224.
LIU Qionglin, WANG Chunyong, YAO Zhixiang, et al. Study on Crustal Thickness and Velocity Ratio in Mid-Western North China Craton[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(9): 2213-2224.
- [5] 贾丽华,李秀丽,李君,等.利用宽频带地震数据资料研究辽宁地区的地壳结构[J].华北地震科学,2013,31(3):1-7.
JIA Lihua, LI Xiuli, LI Jun, et al. Research on Crustal Structure of Liaoning Area Based on Broadband Seismic Data[J]. North China Earthquake Sciences, 2013, 31(3): 1-7.
- [6] 高常波.辽宁震灾风险评估[M].北京:地震出版社,2015.
- [7] 贾丽华,崇加军,刘渊源,等.利用远震接收函数研究辽宁地区的地壳厚度及泊松比[J].地震地质,2010,32(2):260-268.
JIA Lihua, CHONG Jiajun, LIU Yuanyuan, et al. Crustal Thickness and Poisson Ratio of Liaoning Province from Receiver Function Study[J]. Seismology and Geology, 2010, 32(2): 260-268.
- [8] 冯策,焦明若,沈军.辽宁及邻区背景噪声面波群速度结构研究[J].地震,2018,38(1):84-95.
FENG Ce, JIAO Mingruo, SHEN Jun. Surface Wave Group Velocity Structure of Liaoning and Its Adjacent Areas Based on Ambient Noise Tomography[J]. Earthquake, 2018, 38(1): 84-95.
- [9] 高维明,马集遐,姜秀娥.地震危险区的边界划分探讨[J].地震,1993,13(3):1-6.
GAO Weiming, MA Jixia, JIANG Xiu'e. On Boundary Delimitation of Seismic Risk Areas[J]. Earthquake, 1993, 13(3): 1-6.
- [10] 曹凤娟,李彤霞,杨士超,等.辽宁地区地震活动特征及震兆意义[J].防灾减灾学报,2018,35(增刊1):1-7.
CAO Fengjuan, LI Tongxia, YANG Shichao, et al. Characteristics of Seismic Activity in Liaoning Area and Its Precursor Significance[J]. Seismological Research of Northeast China, 2018, 35(Suppl): 1-7.
- [11] 卢造勋,夏怀宽.内蒙古东乌珠穆沁旗—辽宁东沟地学断面[J].地球物理学报,1993,36(6):765-772.
LU Zaoxun, XIA Huaikuan. Geoscience Transect from Dong Ujimqinqi, Nei Mongol, to Donggou, Liaoning, China[J]. Chi-

- nese Journal of Geophysics, 1993, 36(6): 765-772.
- [12] 卢造勋, 刘国栋, 魏梦华, 等. 中国辽南地区地壳与上地幔介质的横向不均匀性[J]. 地震学报, 1990, 12(4): 367-378.
LU Zaoxun, LIU Guodong, WEI Menghua, et al. Lateral Inhomogeneity of Crust and Upper Mantle in South Liaoning, China and Its Relationship with the $M_{7.3}$ Haicheng Earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 1990, 12(4): 367-378.
- [13] 卢造勋, 蒋秀琴, 白云, 等. 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, 1999: 43-51.
LU Zaoxun, JIANG Xiuqin, BAI Yun, et al. Structural Characteristics of Crust and Upper Mantle Andinhomogeneity of the Medium in Jiaoliao and Bohai Regions[J]. North China Earthquake Sciences, 1999: 43-51.
- [14] 王亮, 周龙泉, 焦明若, 等. 海城盖州地区速度结构和震源位置的联合反演研究[J]. 地震, 2014, 34(3): 13-26.
WANG Liang, ZHOU Longquan, JIAO Mingruo, et al. Simultaneous Inversion for Earthquake Hypocenters and Velocity Structure in the Haicheng and Gaizhou Area, Liaoning Province[J]. Earthquake, 2014, 34(3): 13-26.
- [15] NICHOLSON C, SIMPSON D W. Changes in v_P/v_S with Depth: Implications for Appropriate Velocity Models, Improved Earthquake Locations, and Material Properties of the Upper Crust [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985, 75(4): 1105-1123.
- [16] 蔡静观. 波速比计算中的不确定因素和在地震预报中的应用[J]. 地震研究, 2000, 23(1): 51-56.
CAI Jingguan. Nondeterministic Factors in Calculation of v_P/v_S Ratio and Their Application to Earthquake Prediction[J]. Journal of Seismological Research, 2000, 23(1): 51-56.
- [17] 张晖, 高立新, 韩晓明. 内蒙古东部地区波速比变化特征研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35(4): 921-927.
ZHANG Hui, GAO Lixin, HAN Xiaoming. The Variation of Wave Velocity Ratio at the Eastern Region of Inner Mongolia [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 921-927.
- [18] 郑建常, 李冬梅. 基于误差分布的震源区波速比反演及其应用: 乳山震群源区介质性质变化研究[J]. 地球物理学报, 2019, 62(5): 1693-1703.
ZHENG Jianchang, LI Dongmei. Inversion for Velocity Ratios in Focal Areas Based on Error Distribution and Its Application: a Study on Variations of Medium Properties in the Source of the Rushan Earthquake Swarm [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(5): 1693-1703.
- [19] DOMENICO S N. Rock Lithology and Porosity Determination from Shear and Compressional Wave Velocity [J]. Geophysics, 1984, 49(8): 1188-1195.
- [20] 耿乃光, 郝晋升, 李纪汉, 等. 岩石的波速比与静水压的关系[J]. 地震学报, 1992, 14(4): 500-506.
GENG Naiguang, HAO Jinsheng, LI Jishuang, et al. The Relationship of Rock's Velocity Ratio and Hydrostatic Pressure [J]. Acta Seismologica Sinica, 1992, 14(4): 500-506.
- [21] BHAKTA T, LANDRO M. Estimation of Pressure-saturation Changes for Unconsolidated Reservoir Rocks with High v_P/v_S Ratio [J]. Geophysics, 2014, 79(5): M35-M54.
- [22] CATCHINGS R D, RYMER M J, GOLDMAN M R, et al. A Method and Example of Seismically Imaging Near-surface Fault Zones in Geologically Complex Areas Using v_P , v_S , and Their Ratios [J]. Bulletin of the Seimological of Society America, 2014, 104(4): 1989-2006.
- [23] LIN G, AMELUNG F, SHEARER P M, et al. Location and Size of the Shallow Magma Reservoir Beneath Kilauea Caldera, Constraints from Near-source v_P/v_S Ratios [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(2): 8349-8357.
- [24] SAITO S, ISHIKAWA M, ARIMA M, et al. Laboratory Measurements of v_P and v_S in a Porosity Developed Crustal Rock; Experimental Investigation into the Effects of Porosity at Deep Crustal Pressures [J]. Tectonophisice, 2016, 677-678: 218-216.
- [25] 张慧, 李志雄, 李盛. 海南岛及近海波速比特征初步研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(3): 524-534.
ZHANG Hui, LI Zhixiong, LI Sheng. Preliminary Study on the Wave Velocity Ratio (v_P/v_S) in Hainan Island and Off-shore Areas [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 524-534.