

甘肃地区地壳速度的非均匀分布

王周元 范世宏 姬凤英 张树勋

(国家地震局兰州地震研究所)

摘要 用天然地方震以及近震P、S波到时资料反演了甘肃7个分区的地壳结构。其速度非均匀分布表明:就垂向非均匀性而言,河西大于河东,海原、古浪两个8级大震区大于周围地区,横向非均匀性正好相反,但无论垂向还是横向非均匀性都是上地壳(大约以19 km深度为界)大于中下地壳;青藏块体东北缘速度自SSW向NNE的东北角规则变化,上中地壳(约以30 km深度为界)内沿该方向递减,下地壳及上地幔顶部递增;横向非均匀性以低速区带为主,大致沿祁连山断裂系向SSE直到兰州附近,再沿近NS向到舟曲武都,中间与近EW向直到康乐和政的西秦岭北缘断裂低速带交接,高速区主要在嘉峪关、玉门以北,景泰附近及兰州以南等处;中强以上地震不仅在低速区带发生,而且也在高速区及其它地方发生,两个8级大震震源区速度在研究区中地壳内为最低,要注意兰州附近及张掖民乐地区可能潜在的强震危险区。

关键词: 地壳结构 速度分布 甘肃 非均匀性

1 方法、资料和分区

在文献^[1]中对方法作过详细介绍,主要是机器根据资料按一定标准自动将地壳分层,再进行三维反演。这里的主要改进是反演结束后,对层间速度差不满足标准者进行合并,再重新迭代。

所用资料是由1976~1994年甘肃台网地震观测报告提供的近震、地方震初至及莫霍面反射P、S波到时,涉及地震共5100多个。平均说来,各分区大约用到1000个地震和5000多条P、S波射线,最后划分的各网块穿过的P、S波射线都在100条左右。射线具体分布情况表明,除1、6区西南角、3区东北部、5区东北角、7区东南角外,基本上都能给出可信的结果。这样,3、5区的有效范围分别主要是1927年古浪8级和1920年海源8.5级地震的极震区。

各分区的位置和范围示于图1,有关参数列于表1,其中 ΔX 为纬向宽度, H 为平均地壳厚度。各分区 H 值及上地幔顶部速度初值综合参考了有关结果^[1~9],1~3区 $V_{pn}=8.13$ km/s, $V_{sn}=4.55$ km/s;4~7区 $V_{pn}=8.02$ km/s, $V_{sn}=4.60$ km/s;各分区经向宽度都是222.2 km,表中未列出。考虑到习惯和方便,通常将1~3区称作河西地区,4~7区叫作河东地区,而4~6区有时又称为甘肃中部地区。

2 速度的垂向非均匀性

表2给出了各分区最后分层的结果,它反映了大范围平均的背景情况。这里的讨论以P波速度为主。尽管表2较繁杂,但仍有如下特征明显可见:

(1)各分区各层厚度分布差异明显,1、2区较接近,3、5区薄层较多,4、6、7区则相对较平均。厚层多是层与层合并所致,若把层内考虑为垂向均匀梯度层,则在层间速度差接近时,层越厚,其梯度就越小。

(2)河西3个区地壳分别含5、5、6层,明显多于河东4个区的4、5、4、4层,与此同时,3区比河西另两区多一层,5区比河东其它3个区多一层,这似乎表明河西地区地壳速度垂

向非均匀性大于河东地区,两个8级大震区是速度垂向非均匀性最明显的地区。

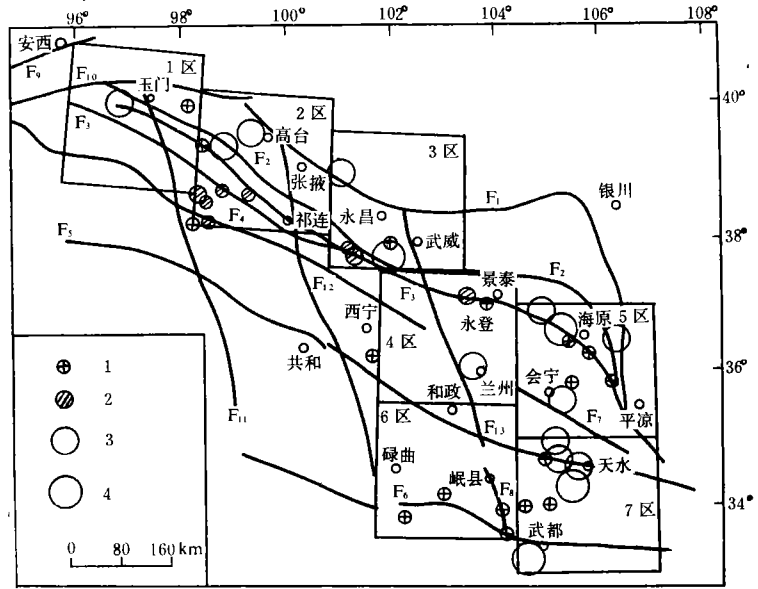


图1 研究区主要活动构造、震中分布及各分区位置范围

- F1 金塔南山—龙首山—图兰泰山—牛首山断裂带;
- F2 河西走廊南缘断裂带; F3 北祁连山断裂系;
- F4 疏勒南山—大通山—大坂山断裂带;
- F5 柴达木北缘—青海南山—西秦岭北麓断裂带;
- F6 花石峡—玛曲—西秦岭南麓断裂带;
- F7 榆中—定西—清水断裂带; F8 岷县—舟曲断裂带;
- F9 三崖山断裂; F10 阿尔金山断裂;
- F11 千峡山—榆树沟山—鄂拉山断裂隆起带;
- F12 榆木山—日月山—礼马日根山断裂隆起带;
- F13 大黄山—当蕊五台山—岷山断裂隆起带;

- 1 1957~1975年的5级地震; 2 1976~1994年的6级地震;
- 3 1976~1994年的7级地震; 4 1957年以前的8级地震

Fig. 1 Main active structures, epicentres and subregions in the studied region.

表1 各分区有关参数

参数	1区	2区	3区	4区	5区	6区	7区
$\Delta\lambda^{\circ}E$	96.0~98.5	98.5~101.0	101.0~103.5	102.0~104.5	104.5~107.0	102.0~104.5	104.5~107.0
$\Delta\varphi^{\circ}N$	38.5~40.5	38.0~40.0	37.5~39.5	35.5~37.5	35.0~37.0	33.5~35.5	33.0~35.0
$\Delta X(km)$	217.9	219.4	220.9	226.6	228.0	232.1	233.4
$H(km)$	53.4	51.0	51.6	50.9	48.4	52.2	48.0

表2 各分区最后分层结果

1区			2区			3区			4区			5区			6区			7区		
H	V_p	V_s	H	V_p	V_s	H	V_p	V_s	H	V_p	V_s	H	V_p	V_s	H	V_p	V_s	H	V_p	V_s
17.8	5.76	3.41	10.6	5.87	3.47	5.5	5.83	3.44	12.1	5.88	3.47	6.4	5.91	3.45	11.1	5.91	3.45	12.2	5.72	3.41
9.6	5.95	3.53	8.1	6.01	3.51	16.6	5.96	3.51	19.7	6.08	3.55	7.4	6.03	3.53	13.7	6.07	3.53	12.7	5.95	3.48
7.8	6.35	3.67	7.8	6.24	3.64	7.7	6.17	3.65	11.9	6.48	3.79	13.6	6.13	3.60	9.6	6.46	3.72	9.3	6.36	3.74
8.4	6.41	3.81	8.5	6.46	3.76	7.4	6.45	3.75	7.2	6.78	4.06	9.3	6.53	3.78	17.7	6.68	3.90	13.8	6.58	3.85
9.8	6.59	3.93	16.0	6.60	3.87	7.6	6.68	3.87	/	7.78	4.43	11.7	6.82	3.97	/	7.88	4.53	/	7.61	4.38
/	7.53	4.40	/	7.76	4.50	6.8	6.84	4.11				/	7.85	4.53						

(3)1区和7区速度结构最接近,1区仅在35 km以下多分出一层, $H=8.4$ km, $V_s=3.81$ km/s,同上一层差别较大,而 $V_p=6.41$ km/s与上层十分接近。若只考虑P波速度,将该两层合并, $V_p=6.38$ km/s,这样1、7两区地壳内所有层速度都一致。这是否与两区都位于青藏块体边缘,并且1区主要为1932年昌马7.6级地震区,7区主要为1879年武都8级和1654年天水8级地震区有关,尚值得进一步探讨。

(4)从大轮廓上看,研究区速度分层大致可分为三大部分:1区和7区,2区和3区,4~6区。3个大区各层平均速度(表3)说明:河西比河东多的一层大致是第3层,埋深约20 km,该层内河西3个区速度从西向东明显递减;3区较1、2区多的一层位于地壳底部,厚约7 km, $V_p=6.84$ km/s;5区较河东其它3个区多的一层埋深约14 km,厚约14 km, $V_p=6.13$ km/s,注意到3区第3层 $V_p=6.17$ km/s,该两个第3层速度接近,同属研究区内第3层的最低速度,两个层厚度差别近1倍,埋深分别为13.8和22.1 km,层底深度甚为接近,分别为29.8和27.4 km。古浪8级地震震源深度 $h=20$ km*,与此一致。这些有可能表明这两层分别与两个8级大震震源区有关。

表3 3个大区各层平均速度

	1,7区		2,3区		4~6区	
	V_p	V_s	V_p	V_s	V_p	V_s
V_1	5.74	3.41	5.85	3.46	5.90	3.46
V_2	5.95	3.51	5.99	3.51	6.06	3.54
V_3	6.36	3.71	6.21	3.65	6.13***	3.60***
V_4	6.41*	3.81*	6.46	3.76	6.49	3.76
V_5	6.59	3.89	6.64	3.87	6.76	3.98
V_6			6.84**	4.11**		
V_n	7.57	4.39	7.69	4.44	7.84	4.50

*仅1区,**仅3区,***仅5区

由表3还可见,中部3个区各层平均速度基本上都是最高的,1区和7区则最低,唯有第3层例外,形成鲜明的反差。

(5)上地幔顶部速度 V_{pn} 都在 $7.53\sim 7.88$ km/s 间, V_{sn} 都在 $4.38\sim 4.53$ km/s 间,平均说来, $V_{pn}=7.72$ km/s, $V_{sn}=4.45$ km/s,明显小于平均初值 $V_{pn}=8.07$ km/s 和 $V_{sn}=4.58$ km/s,这可能归因于反演分区较小从而限制了所用射线的穿透深度较浅所致,这样它可能表明研究区内莫霍面为一渐变的过渡带;此外也可能与研究区位于青藏块体东北缘并处于构造活动地区有关。

3 青藏块体东北缘地壳速度的垂向非均匀性

1~5区位于青藏块体北缘,3、4、6区位于块体东缘北段。以各分区中心点坐标为该区代表,北缘 $V_{p-\lambda}$ 和东缘 $V_{p-\varphi}$ 分别示于图2a和b。为了便于比较,该图也给出了上地幔顶部速度。1、2和7区速度同示于图2b中。图2给出了各分区间同一层位的速度差异及变化情况,也给出了各分区内不同层位速度分布,因此它虽然为一平面分布图,但具有准立体特征。图中总体变化趋势明显可见:

(1)大致以 $V_p=6.05$ km/s 为界,其上速度分布较复杂,其下包括上地幔顶部在内,除个别点外,自下而上各区同一层位的速度规律性较清晰,说明上地壳的垂向非均匀性更突出。该界面在各分区的埋深为 $11.1\sim 27.4$ km,平均约 18.6 km,似可作为上地壳的下界。

(2)大致以 $V_p=6.4$ km/s 为界,其上下速度分布的变化趋势明显反向,如在图2a中,界面之上,包括上地壳在内,块体北缘地壳速度自西向东降低,其下则自西向东增高,表明前面提到的河西3个区第3层速度自西向东明显降低的变化实际上并非特例。界面在各分区的深度变化范围为 $24.8\sim 35.2$ km,平均约 30.0 km,似可作为下地壳的上界。

(3)图2b中青藏块体东缘地壳速度垂向分布变化表现出大致以4区为界,中上地壳速度由南北向4区降低,下地壳速度则由南北向4区增高。注意到4区正好位于青藏块体的东北角附近,似可认为青藏块体东北缘速度自SSW向NNE在上地壳内递减。在下地壳递增。这样就不难理解相距较远的1、7两区速度垂向分布近乎相同的现象。

4 速度的横向非均匀性

为节省篇幅这里略去了各分区各层反演结果的原始图象,但由这些图以及文中给出的图件均可看出各层速度横向非均匀分布,3、5区都是最简单的,速度值起伏量和涉及的区域都有限,换言之,两个8级大震区速度横向非均匀性明显小于其它地区。

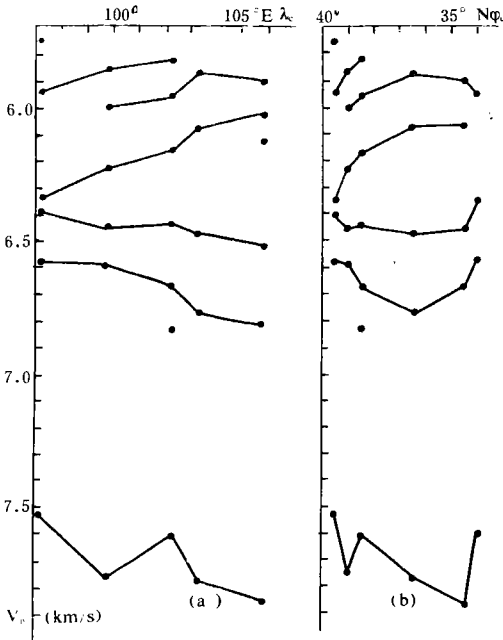


图2 各层区速度随 λ_c 和 φ_c 分布

Fig. 2 Velocity distribution of subregions and layers versus λ_c and φ_c .

根据原始图象,并考虑到所用理论、方法、资料等因素,加之各区实际结果及其可比性、边界附近存在的连续性和一致性,以各分区各层平均速度为准,以 $\pm 0.02 \text{ km/s}$ 及 $\pm 0.05 \text{ km/s}$ 为界划分高速区。再将结果按上节结果简化为上、中、下地壳3部分,这与按各分区地壳厚度 17 km 左右平均划分上、中、下地壳的结果基本一致。这样处理突出了各层内的相对高(低)速特性。图3a和b分别是以 0.02 km/s 为界的低高速分布,图3c和d是以 0.05 km/s 为界的低高速分布,可称作低高速核心区。图3中同样给出了上地幔顶部相应的速度分布。从中可见:

(1)图3a中甘肃地区地壳内低速区在地面的投影主要呈两条带状展布,一是从1区东南部沿河西3个区南缘向SSE延伸到武威附近,二是河东中部 35°N 以南自东部边界向NW延伸延伸到康乐和政一带。此外,在兰州、永靖、临洮、榆中、靖远一带及宕昌、舟曲、武都一带还有两个较集中的低速区。上地幔顶部的低速区正好将这些区带串通,在 104°E 附近形成一近NS向的低速带。但从图3c可见前述两个带仍是最突出的低速带的核心地区。

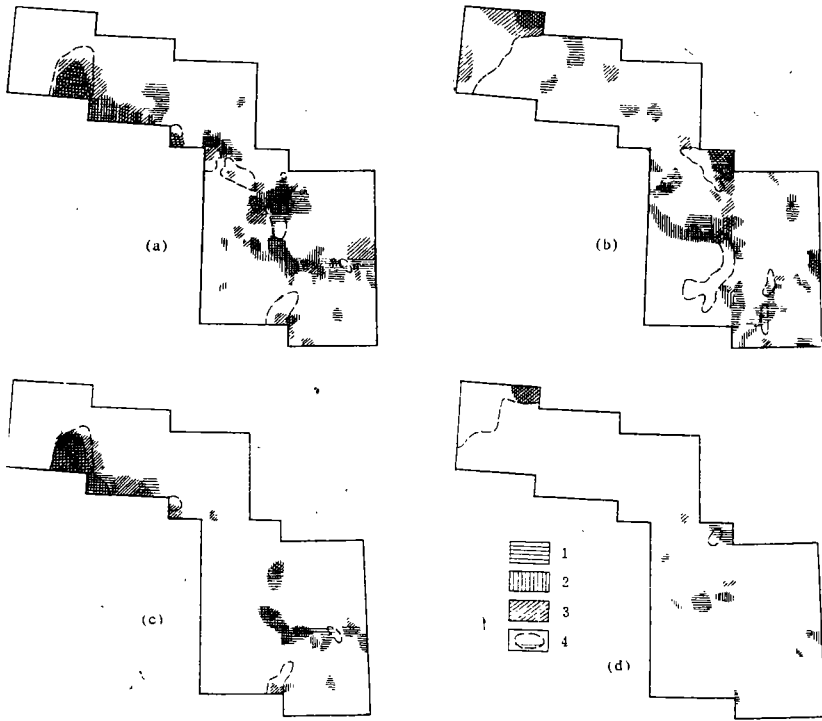


图3 (a)以 0.02 km/s 为界的低速区; (b)以 0.02 km/s 为界的高速区;
(c)以 0.05 km/s 为界的低速区; (d)以 0.05 km/s 为界的高速区。

1 上地壳; 2 中地壳; 3 下地壳; 4 上地幔顶

Fig. 3 (a) Lower velocity area bounded at 0.02 km/s . (b) Higher velocity area bounded at 0.02 km/s .

(c) Lower velocity area bounded at 0.05 km/s . (d) Higher velocity area bounded at 0.05 km/s .

(2)图3b中地壳内高速区在地面投影的最突出之处在 36°N 附近,即自定西、榆中向NW延伸到青海尖扎、化隆的带状分布。其次是景泰地区,1区东北角大约在嘉峪关、玉门以北。再其次是宕昌、舟曲、武都一带,青海乐都、西宁、互助及大坂山一带,以及天水、成县、康县以西近NS向的高速条带。高速区远不如低速区那样集中连片成带。其另一突出特点是零星小

区块不少,并且它们似乎沿以下路径展布:自陕西陇县经固原、同心到景泰、古浪,再到永昌,经龙首山、临泽到金塔、嘉峪关、玉门以北一带。上地幔顶部的高速区在 104°E 附近并把高速区连成带,其次是把景泰、古浪连成片,把1区西北部连成片。图3a中的高速核区则是零星小区,分布范围远不如低速核区。

(3)这些高低速区带有的贯穿了整个地壳,有的仅涉及某些层位。低速带在天祝、门源以西基本上贯穿了整个地壳,河东的兰州附近,天水以西涉及到中上地壳。较深的高速带区主要有嘉峪关、玉门以北地区,景泰地区,定西、榆中、兰州、永靖、临夏一带。

(4)高低速区带大多泾渭分明,但有3处交叉重迭(图3c和d):一是兰州榆中附近,二是宕昌、舟曲、武都一带,三是陕西陇县附近。兰州附近的低速区似一柱体,其在地表位于兰州以东,榆中以北,较陡峭地向北斜插入地下,然后在下地壳内消失,它在下地壳内位于皋兰以东。高速区如另一柱体,其在地表的中心位于东乡、和政一带,较平缓地沿NEE斜插地下,也在下地壳内消失,它在下地壳的位置正好是低速柱体在地表的位置。宕昌、舟曲、武都在上地壳为高速区,在中下地壳及上地幔顶部为低速区,该低速区似有西移且面积渐增之势,反映出速度与均值之差自地表向下向西递减的特点。陇县附近则是上地壳低速区和中地壳高速区。

(5)总体上看,低速区比高速区更鲜明突出,成带性更明显,穿透地壳能力更强,图象也更复杂。但不管是高速区还是低速区,它们有两个共同点:一是越往下,非均匀性图象越简单,表明甘肃地区地壳速度分布横向非均匀性与垂向一样,也主要体现在上地壳,而且以低速为主;二是河东地区的横向非均匀性明显大于河西地区,这与两个8级大震情况一样,正好与垂向非均匀性相反。

5 讨论和结论

(1)研究区地壳速度横向非均匀分布总体上与区内主要活动构造(图1)非常符合。本文结果基本上反映了活动构造的主骨架:低速带主要有河西的祁连山断裂系及疏勒南山断裂带和河东的西秦岭北缘断裂带;而高速带主要有河西的阿尔金断裂、金塔南山—龙首山—图兰泰—牛首山断裂带和河东的古浪—中卫—六盘山断裂带、大坂山断裂带;此外 104°E 附近的近NS向的推测隐伏断裂带^[10]上高低速区交叉重迭较为复杂。值得注意的是,同为区内的岩石圈活动断裂带,有的为高速带,有的为低速带,就是同一断裂带上也有高低速段并存现象,这些可能反映了活动剧烈程度、应力集中情况、温度差异、介质强度及地震活动差异等,应深入研究。

(2)两个8级大震区及河西地区相对周围地区而言地壳内速度的垂向非均匀性大,而横向非均匀性小。1920年海源8.5级大震后甘肃地区强震活动由河东的近南北向转移到河西的近东西向;近40年来研究区内中强地震活动总体上看河东河西近乎各占一半,但应注意到前后两个20年区内地震活动分属两个不同的活动期*,并且两个活动期分别以河东、河西为主要场所,所占活动期内地震数的比例都在 $2/3$ 左右,表明两期的地震活动也有所转移,后一期的频次和强度都高于前一期,正好与期内速度垂向和横向非均匀特征吻合。值得注意的是,该非均匀性是否与地震活动有关以及是否存在长期而缓慢的变化。如果这点得到证实,则两个8级大震区的情况就不仅是地震的结果,还可能与发震环境有关,或者说,它有可能作为确定未来潜在强震危险区的一个判据而值得进一步研究。

(3)研究区内有记载的 $M_s \geq 7.0$ 地震共15个,40年来 $M_s \geq 5.0$ 地震34个,其震中分布

* 王周元,甘肃地区1994年地震趋势意见,1993-10.

(图1)与图2对比,可分为4类:低速区(LV),高速区(HV),高低速交叉区(L/HV)和普通区(#),其统计情况列于表4。它表明近50%地震位于低速带区,这是人们较为普遍接受的概念。不仅如此,余下的地震分别位于其它3种区内,其中高速区最多,占50%左右。最典型的例子是1932年昌马7.6级地震和1990年景泰6.2级地震,有关的研究解释也有报导^[1,11]。应当指出的是:

表4 地震统计结果

	LV	HV	L/HV	#	Σ
历史地震($M_s \geq 7.0$)	6	4	3	2	15
1957~1975($M_s \geq 5.0$)	5	3	2	5	15
1976~1994($M_s \geq 5.0$)	12	4	1	2	19
Σ	23	11	6	9	49

①表中所列统计结果仅是初步的,若考虑3、5区低速层等因素,那么普通区的地震个数将要减少,高低速区要增加。

②历史强震分布比例明显偏离平均结果,1957~1975年间 $M_s \geq 5.0$ 地震分布也偏离较大,除了统计量小外,可能还包含有随时间的变化。

③这种统计在今后的监测预报中有一定的参考意义。中强震下一活动期的主体区域很可能在河东,这样,兰州及周围便成为甘肃地区最复杂的高低速都集中的地区,同时西秦岭北缘断裂低速带也值得重视。从长远看,张掖民乐地区中地壳速度是3、5区以外的最低者,应注意7级以上强震的危险性。

(4)青藏高原的隆起是印度板块与亚欧板块长期碰撞的结果。已有研究认为印度板块挤入青藏高原较软的下地壳内,由于塔里木地台的阻挡,其地壳物质缓慢东流,形成了当今的地形地貌等^[12]。本文涉及的研究区与上述区域有一定区别,但它应有类似于高原的特征,本文结果似乎也可以用地壳(主要是上中地壳)物质缓慢东流来解释。

本工作曾得到张掖现场监测预报、台网优化改造效能评价等课题组及兰州地震研究所科研处的支持,杨斌同志提供了研究区最新活动构造图,VAX机组在计算中给予大力协助,在此一并致谢!

(本文1995年7月10日收到)

参考文献

- 1 王周元. 张掖民乐地区地壳细结构及其动态变化. 祁连山中段地震危险基础研究文集, 地震出版社, 1994. 170~178.
- 2 王周元, 等. 南北地震带北段上地幔速度结构成象(Ⅱ)-应用和结果. 西北地震学报, 1991, 13(1): 1~8.
- 3 张少泉, 等. 中国西部门源-平凉-渭南地震测深剖面资料的分析解释. 地球物理学报, 1985, 28(5).
- 4 滕吉文, 等. 柴达木盆地的深层地震反射波和地壳结构. 地球物理学报, 1974, 17(2).
- 5 王周元. 甘肃地区分层地壳结构. 西北地震学报, 1984, 6(3): 84~91.
- 6 梁桂培, 等. 甘肃河西地区深部构造. 西北地震学报, 1983, 5(1).
- 7 赵坤, 等. 青海乐都爆破的地震观测结果. 西北地震学报, 1979, 1(4).
- 8 张诚, 等. 永登系列爆破甘宁青地区的地震台网的观测解释与地壳结构. 西北地震学报, 1985, 7(4).
- 9 曹克信, 等. 甘肃及邻近地区的Pn波速度. 地震地磁观测与研究, 1991, 12(4).

- 10 王振声,等. 中国南北地震带的范围及地震活动特征的初步探讨. 地球物理学报,1976,19(2).
- 11 Rybicki K. Stress field due to faulting in the presence of a high rigidity barrier(asperity). B. S. S. A. ,1988,78(1).
- 12 曾融生,等. 青藏高原及其东部邻区的三维地震波速度结构与大陆碰撞模型. 地震学报,1992,14(增):523~533.

THE INHOMOGENEITY OF CRUSTAL VELOCITY IN GANSU REGION

Wang Zhouyuan Fan Shihong Ji Fengying Zhang Shuxun
(*Earthquake Research Institute of Lanzhou,SSB*)

Abstract

Using P and S wave arrivals of local and near earthquakes, the crustal structures of 7 subregions in Gansu were inverted. The results show that: (1) vertical heterogeneity of velocity for Hexi region is greater than that for Hedong region, and those of focal regions of Haiyuan and Gulang M8 events are greater than those for other regions, but horizontal heterogeneity is contrary. Vertical and horizontal inhomogeneity of upper crust (bounded at about 19 km depth) is greater than that of middle and lower crust; (2) velocity along the northeast edge of the Qinghai-Xizang block decreases along SSW-NNE direction in a regular manner for upper and middle crust (bounded at about 30 km depth), but increases for lower crust; (3) horizontal inhomogeneity is characterized by outstanding lower velocity zone, which strikes along Qilian fracture system of SSE direction up to near Lanzhou, then extends southward to Zhouqu-Wudu, in middle section crosses lower velocity zone of the north edge fracture in western Qinling, but higher velocity areas locate mainly in north of Jiayuguan-yumen, near Jingtai and south of Lanzhou etc.; (4) moderate and greater earthquakes occurred in not only lower velocity zones, but also higher velocity and other areas. The focal velocity of the two M8 events mentioned above is the lowest in middle crust of studied region. Thus, future strong earthquake possibly will occur near Lanzhou and in Zhangye-Minle region.

Key words: Crustal structure, Velocity distribution, Gansu, Inhomogeneity