

南北地震带北段上地幔速度结构 成象(Ⅲ)——应用和结果*

王周元 姚政生 杜志俊

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

根据地震波走时资料反演得出南北地震带北段地壳和上地幔速度结构,发现在该区上地壳存在三个近东西向的低速条带,其空间展布与该区内现今活动构造基本一致;上地幔速度分布显示在该区似有平行的北东和北西向低速条带相互穿插,总体呈现网状;海原—古浪断裂带在上下地壳及上地幔的速度结构中均表现出相应的低速带,表明它是切穿地壳的深大断裂。通过反演还发现青藏块体的东北部边界大致在天祝—兰州—静宁—千阳—略阳—江油一带。

一、资 料

文献〔1〕,〔2〕分别介绍了对南北地震带北段进行地震波走时资料反演的理论方法和数值模拟结果,在此基础上,本文对 32° — 39° N, 100° — 108.5° E 范围内上地幔速度结构进行反演成象。从区内及附近118个台站(图1)记录到的1976—1987年间发生的905个地震资料中(图2),共选取13115个清晰的P_n波和3853个S_n波到时。这些地震的平均深度为15公里。对绝大多数地震都用震中周围200公里以内的近台初至P、S波资料借助计算机重新定位。定位时采用多功能程序〔8〕,使用文献〔4〕给出的4层模型。考虑到莫霍面倾斜时对理论走时的影响,根据用重力资料反演得出莫霍面等深线(图3)及其它结果〔6—8〕,拟合得出研究区内莫霍面倾向南西西, $\phi_0 = 260.9^{\circ}$,倾角 $\alpha_0 = 1.4^{\circ}$,参考坐标原点坐标为 32° N, 100° E,地壳厚度 $H_0 = 64.4$ 公里。对所有射线均可按这些基本参数和射线系数求其倾角 α_{ij} ,即

$$\operatorname{tg} \alpha_{ij} = \operatorname{tg} \alpha_0 \cos (\phi_{ij} - \phi_0)。$$

式中 ϕ_{ij} 为射线方位角。点(x, y)处地壳厚度

$$H = H_0 + \sqrt{x^2 + y^2} \operatorname{tg} \alpha_x,。$$

式中 α_x 为坐标原点至(x, y)点方向上莫霍面倾角。

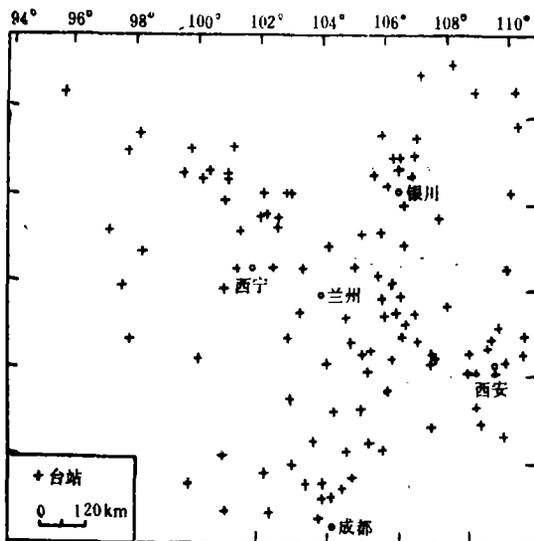


图1 台站分布
Fig. 1 Distribution of seismic stations

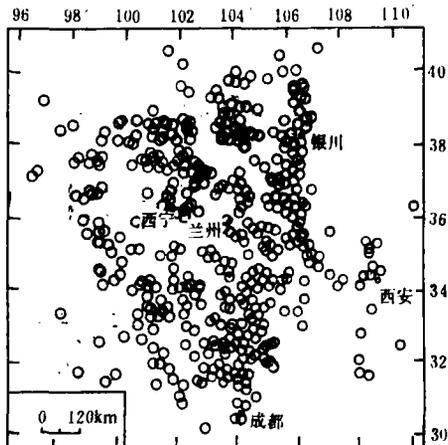


图2 震中分布
Fig. 2 Distribution of epicenters

根据国内外研究结果和研究区内具体情况, 确定选取资料的速度范围是: $V_{p,2}$ 为 7.85—8.55 km/s, $V_{s,2}$ 为 4.30—4.95 km/s。另外要求各射线落入研究区内的长度不小于网格化后最小网格对角线长度的 2 倍, 以保证迭代速度和结果的精度。

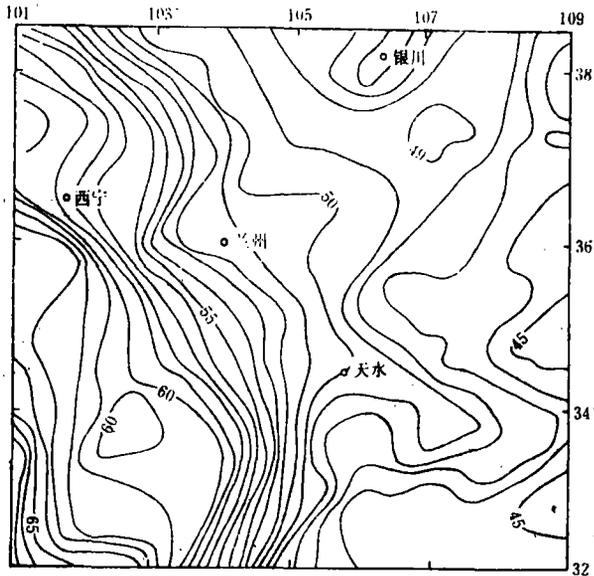


图3 研究区莫霍面等深线图
Fig. 3 Isodepth map of Moho-surface of studied region

二、成像结果

1. 上地幔结构。

上地幔反演结果示于图 4 中。其中的基本参数如下: 全区平均速度 $V_{p,2} = 8.18 \pm 0.23$

1) 梁桂培等, 陕甘宁青地震区划图, 原则与方法研究材料之三, 深部与地震(重力部分), 1986.

km/s, $V_{p,n} = 4.63 \pm 0.21$ km/s; 走时总方差 $\sigma_{\bar{p},n} = 0.69$ 秒, $\sigma_{s,n} = 1.61$ 秒; P_n 波最高和最低速度分别为 8.62 km/s 和 7.73 km/s, S_n 波最高和最低速度分别是 4.94 km/s 和 4.32 km/s, 由此可得 $\Delta V_{\bar{p},n}/V_{p,n} = 10.9\%$, $\Delta V_{s,n}/V_{s,n} = 13.4\%$ 。上述结果都与前人的研究结果基本一致 [4-11]。

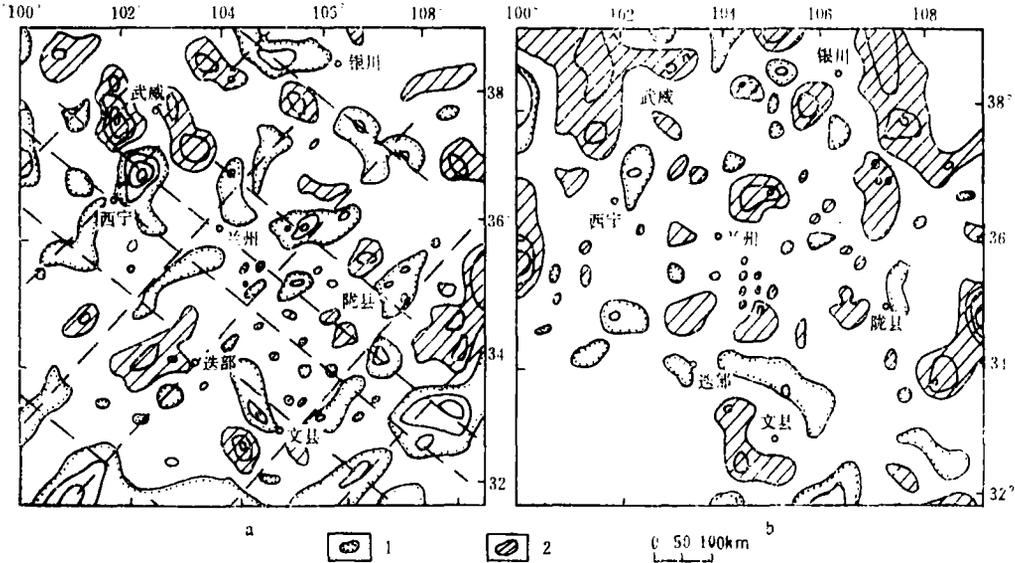


图4 上地幔速度分布

a. P_n 波 b. S_n 波 1. 低速区 2. 高速区

Fig. 4 Velocity distribution in upper mantle

a. P_n -wave b. S_n -wave 1. low velocity 2. high velocity

由于 P_n 波资料远比 S_n 波丰富, 并且 P_n 波资料精度明显优于 S_n 波, 所以下面的分析讨论均以 P_n 波结果为主。

上地幔结构成象结果显示, 研究区内似有多条北东—南西向和北西—南东向低速条带相互穿插、切割。其中北东—南西向的低速带主要有: (1) 沿龙门山断裂带, 经四川盆地西北缘穿过米仓山直到汉中盆地, 其中米仓山地区为速度正常区; (2) 文县东临江—康县—徽县—千阳—陇县—泾川一带, 其中西秦岭和陇山地区速度正常; (3) 四川壤塘南—若尔盖—岷县—通渭—西吉—陕甘宁交界处; (4) 青海斑玛西—泽库东—临夏—兰州—中卫; (5) 青海同德西—西宁—互助—古浪西; (6) 青海湖—俄博。

北西—南东向的低速带主要有: (1) 陕甘宁交界—内蒙查汗池; (2) 千阳—西吉—景泰, 其中六盘山地区为明显的高速区; (3) 陕西西乡—天水—兰州—门源—俄博; (4) 汉中—礼县—临夏—西宁—刚察; (5) 广元—文县—迭部—龙羊峡; (6) 四川马尔康—青海玛沁东。

上述背景下的高速区除了六盘山、秦岭展布区外还有: (1) 鄂尔多斯地台区; (2) 河西走廊东段及邻近地区, 具体指张掖—民乐—门源—永登—中卫—查汗池围限地区; (3) 甘青川交界地区, 即迭部—同德—大武—阿坝—红原围限的地区; (4) 甘川交界东段, 即文县—南坪—松潘—平武—青川围限的地区; (5) 天水—甘谷地区。

2. 地壳速度结构。

将前述方法和处理程式用于地壳速度结构成象。以25公里深度为界将地壳分为上下两

层, 定位时根据震源深度和震中距将地震波射线分为只在上层传播和绕射中间层面之下传播两类, 分别用于成象。成象区范围为 101° — 107° E, 32.5° — 38° N。选用1976—1987年近震地方震2900多个, 射线22000多条, 其中上地壳17000条左右, 下地壳约5000条。成象结果分别示于图5和图6中。基本参数如下:

上地壳平均速度 $V_p = 5.89 \pm 0.13 \text{ km/s}$, $V_s = 3.47 \pm 0.10 \text{ km/s}$, 走时总方差 $\sigma_p = 0.45$ 秒, $\sigma_s = 0.91$ 秒, P波最大和最小速度分别是6.16和5.72 km/s, $\Delta V_p/V_p = 7.5\%$, S波的最大和最小速度分别为3.70和3.29 km/s, $\Delta V_s/V_s = 11.8\%$; 下地壳平均速度 $V_p = 6.48 \pm 0.16 \text{ km/s}$, $V_s = 3.75 \pm 0.14 \text{ km/s}$, 走时总方差 $\sigma_p = 0.47$ 秒, $\sigma_s = 0.95$ 秒, P波最大和最小速度分别是6.78和6.26 km/s, $\Delta V_p/V_p = 8.0\%$; 相应的S波是4.17和3.53 km/s, $\Delta V_s/V_s = 17.1\%$ 。

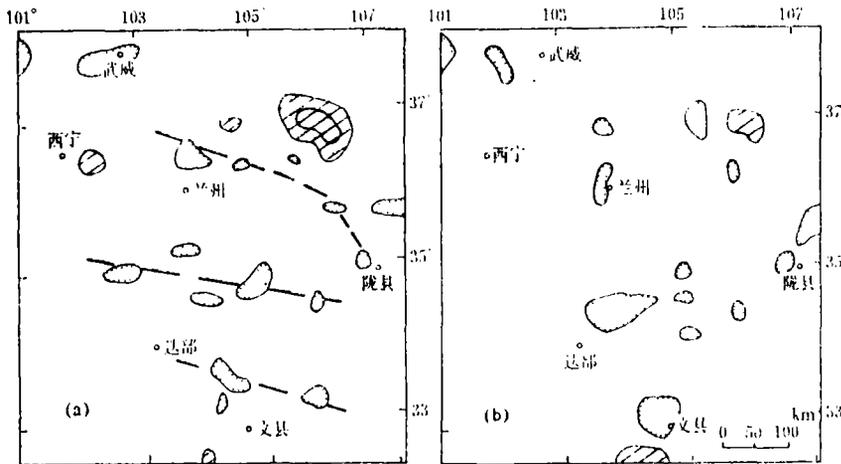


图5 上地壳速度分布

a.P波 b.S波 1.低速区 2.高速区

Fig. 5 Velocity distribution in upper crust

a.P-wave b.S-wave 1.low velocity 2.high velocity

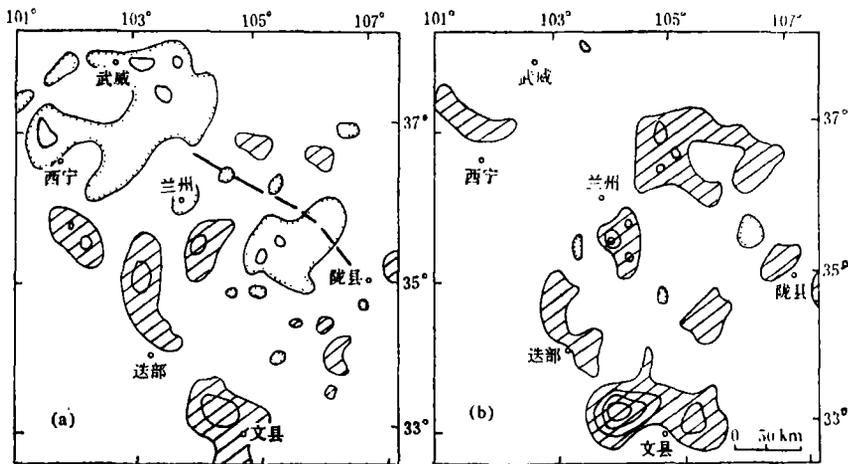


图6 下地壳速度分布

a.P波 b.S波 1.低速区 2.高速区

Fig. 6 Velocity distribution of lower crust

a.P-wave b.S-wave 1.low velocity 2.high velocity

由图 5 a 可见，上地壳 P 波速度呈非均匀分布，低速区分布呈现三条近东西走向的条带，即康县—武都—舟曲，天水—甘谷—陇西—临夏和陇县—固原—西吉—海原—靖远—景泰，

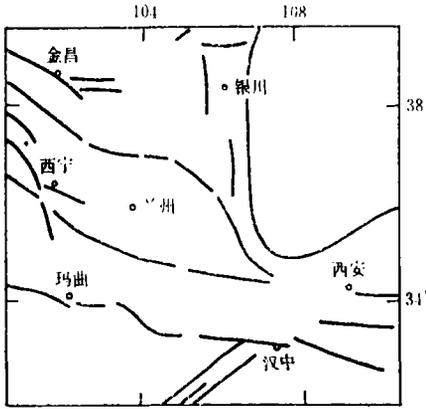


图 7 南北带北段现今活动断裂带
Fig. 7 Recent active fracturing zones of the northern portion of NSB

这同南北地震带北段现今活动断裂带²⁾(图 7)一致。高速区主要集中在海原—同心之间。整个 P 波速度分布图象突出了主要构造活动带的低速特征，而其余地区的起伏变化不大，均在成象速度精度之内，但 4 % 以上的前兆性速度异常可以分辨出来。

下地壳资料不够丰富，从图 6 a 中大致分辨出河西走廊东部直到景泰—兰州的下地壳均为低速区，这和上地幔在该区为明显高速区形成鲜明对照；此外海原大震区亦为低速区。高速区则主要集中在文县—迭部—临夏—贵德一带。

三、讨 论

1. 丁国瑜等^[12]研究了我国现代活动的地壳破裂网络，指出大约在 $N45^{\circ}E$ 和 $N135^{\circ}W$ 方向上常常可追踪出延伸上千公里，方向非常相近的多条平行带，实际上这是全球性构造断裂网络的一部分。张伯声等^[13]研究波浪状镶嵌构造时也指出了在我国存在类似的一系列北东向和北西向交叉构造，并解释了南北带地震活动规则性迁移等重要现象。向光中等^[14]研究了该区内的北东和北西向重要构造，指出该构造自新生代以来都在活动，其延伸不受其它构造干扰，相反却常常切穿其它构造，在深部其可能出现于莫霍面附近或更深部位。上述研究表明，在地壳内存在北东和北西向活动构造，其中不少是深入到上地幔的最新断裂。考虑到成象的精度，图 4 a 中的低速区基本上可用类似于上述的北东向和北西向交叉的网络图象来解释。如果这一情况属实，并且低速条带能与破裂带联系起来，则有可能表明上地幔中也显示出类似的网络结构迹象。对比两个网络图象(图 4、图 8)可以看到，二者比较接近。如果认为上地幔内低速带是高温物质及其上涌的结果，则不难想象地壳内正在发展着的最新断裂网络系统的动力源更主要地很可能是上地幔的运动。并且由此还可推断地幔运动除了简单的对流图象外，在局部地区，尤其在大陆壳下还有更复杂的形式，其影响着上地幔和地壳运动，对地质构造、地震预报等都有重要意义。

2. 研究区内历史强震较多(图 9)，近期中小地震活动频繁。利用本文成象结果有利于探寻地震的深部环境。图 9 表明公元 1900 年以来研究区内的强震主要集中于海原—古浪断裂带和南平—迭溪两处，而近期中小地震最活跃的地区则位于古浪—九条岭—门源地区，这里发生的地震次数约占整个甘肃地区地震总数的 $1/4$ 。十多年来研究区内最大地震均分布在南平—平武一带。对照图 4—6，这些地区的地壳和上地幔速度结构的明显特征表现在：
(1) 上地幔地震波速度水平梯度在整个研究区内属于最大之列，同时又位于地壳和上地幔

2) 杨斌等，南北带北段地震地质特征及近期强震危险区，1985。

垂向速度梯度最大之处。据此可以认为，莫霍面附近速度梯度最大的地方，地壳内易于发生地震。如果把这种速度梯度或差异考虑为介质温度或密度差异的反映，则可以说这种差异运动是地幔动力学过程的结果，它为壳内地震的孕育发生提供了重要的力源，形成了地震的重要深部条件。（2）陇县—海原—景泰—古浪一带为一深大断裂，在这一带在上地壳、下地壳和上地幔均能找到与之相应的低速条带痕迹。同时这里又是巨震孕育发生的场所，1920—1927年该带相继发生两次8.0级以上大震，就时空间距的短暂而论都是罕见的。而古浪以西的河西走廊东段地区上地幔地震波速度明显偏高很可能是这一罕见现象的另一重要条件。因此可以认为，本文所用方法有希望成为探寻深大断裂及大地震潜在危险区的重要手段之一。

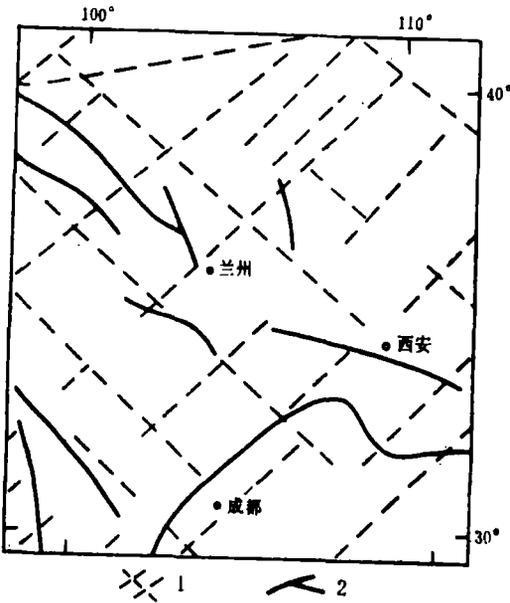


图8 地壳现代破裂网络示意图[12]
1.地壳破裂网络 2.主要断裂
Fig.8 Diagram of recent fracturing of regular network
1.fracturing network 2.main fault

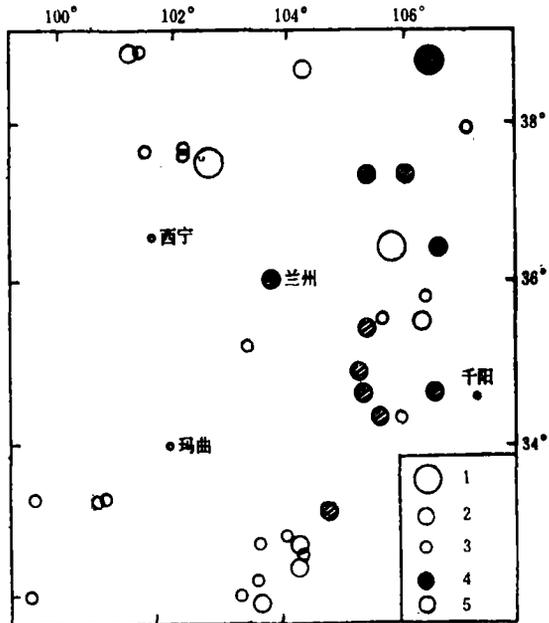


图9 南北带北段强震震中分布
1.M=8-8.9 2.M=7-7.9 3.M=6-6.9
4.1900年以前 5.1900年以后
Fig.9 Epicentre distribution of strong earthquakes of the northern portion of N-S Seismic Belt
1.M=8-8.9 2.M=7-7.9 3.M=6-6.9 4.before 1900 5.after 1900

3.郭增建针对地震迁移方向往往与浅层活动构造带不一致的矛盾提出了“立交模式”，认为在地壳深部存在与浅层活动断裂带斜交的构造，其运动直接制约着浅层的地震活动和迁移等[15]。本研究中上地壳低速带揭示的现今活动构造带正好与近代地震活动密集带一致，而中强以上地震迁移路线则多与深部，尤其是上地幔构造带接近。这就表明立交模式是符合实际的，同时也再次强调了加强深部研究探测的重要性。

4.在图4 a中明显可见，大致以天祝—兰州—静宁—千阳—略阳—江油一带为界，研究区东北侧速度异常与分布的规则性和完整性都远比西南侧强，这与区内航磁异常⁸⁾有些类似，表明西南侧上地幔物质受到了某种扰动而有变异。在该图中北东向低速条带显示明显而完整，其规则性也远比北西向强，这有可能表明影响上述变异的扰动似为来自西南侧的向北东方向的挤压。如果上述情况属实，则同印度板块对欧亚板块的碰撞挤压在这一地区显示的

方向一致。因而上述边界很可能是挤压形变带的前缘。此外，该前缘也正好是南北地震带北段内最明显的地热异常区^[16]，又位于地壳上地幔速度非均匀性揭示的深大断裂带的前缘。由此可见，上述边界很可能是青藏块体的东北边界。

四、结 束 语

本文介绍了对南北地震带北段地壳和上地幔进行速度结构成象的初步尝试，并对所得结果作了简要讨论。尽管反投影成象的精度受到方法和资料的限制（对此将另作专门讨论），但对于地壳内和上地幔的主要结构特征还是能清楚地揭示出来。研究结果还表明，对于地壳内6.0级以上地震的孕震体，波速异常幅度不低于4%时，利用本文的方法完全能将其圈定出来。毫无疑问，若能进一步改进方法，提高资料精度有可能收到更好的效果。总之，利用本文的方法，结合使用丰富的天然地方震近震资料，所得结果在研究深部构造及地球动力学研究和寻找潜在地震危险区中都能发挥较好的作用。

（本文1988年11月20日收到）

参 考 文 献

- [1]姚政生等，南北带北段上地幔速度结构成象(Ⅰ)——原理和方法，西北地震学报，Vol.11, No. 2, 1989.
- [2]王周元等，南北地震带北段上地幔速度结构成象(Ⅱ)——数值模拟计算，西北地震学报，Vol.11, No. 4, 1989.
- [3]王周元，测震分析处理多功能程序，地震地磁观测与研究，Vol.10, No. 1, 1989.
- [4]王周元，甘肃地区分层地壳模型，西北地震学报，Vol. 6, No. 3, 1984.
- [5]赵坤等，青海乐都爆破的地震观测结果，西北地震学报，Vol. 1, No. 4, 1979.
- [6]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，Vol.28, No. 5, 1985.
- [7]董奇珍，甘川陕宁青五省(区)部分地区的地壳结构，西北地震学报，Vol.10, No. 1, 1988.
- [8]赵珠等，四川地区地壳上地幔速度结构的初步研究，地震学报，Vol. 9, No. 2, 1987.
- [9]傅淑芳等，地震学教程(下册)，地震出版社，1980.
- [10]Kayal, J.R. and R.De, Pn velocity study using a temporary seismographic network in the Shillong plateau, Northeast India, B.S.S.A., Vol.77, No. 5, 1987.
- [4]M. 伯特，地震学引论，许立达译，地震出版社，1978.
- [12]丁国瑜等，我国地震活动与地壳现代破裂网络，地质学报，Vol. 1, No. 1, 1979.
- [13]张伯声等，地壳的波浪状镶嵌构造与地震，西北地震学报，Vol. 2, No. 2, 1980.
- [14]向光中等，青藏块体内北东向构造及其地震活动(以甘宁青地区为例)，西北地震学报，Vol. 9, No. 1, 1987.
- [15]郭增建，立交模式及其在地震预报中的应用，西北地震学报，Vol. 7, No. 1, 1985.
- [16]张必敷等，南北地震带北段地温场的初步探讨，西北地震学报，Vol. 9, No. 1, 1987.

8) 陈爱玲等，武都—青铜峡地带深部构造与地震活动，南北地震带未来十年大震危险性判定研究材料，1985.

IMAGING OF VELOCITY STRUCTURE OF THE UPPER MANTLE FOR
THE NORTHERN PORTION OF NORTH-SOUTH SEISMIC BELT (III) —
APPLICATION AND RESULTS

Wang Zhouyuan, Yao Zhengsheng, Du Zhijun
(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Gansu, China*)

Abstract

Based on [1][2], imaging of seismic velocity structure of crust and upper mantle for the northern portion of N-S Seismic Belt is made. The velocity distribution of upper crust exists three low-velocity belts oriented near EW trend, which agrees with recent active fracturing zones, while in upper mantle there are a lot of low velocity belts trend NE and NW, which appear network structures across each other. It is pointed out that the Haiyuan-Guyuan fracturing zone may be a great deep fault, being low velocity belts in upper-, lower-crust and upper-mantle. Finally, it is suggested that the northeastern boundary of the Qinghai-Xizhang Block may locate along Tianzhu-Lanzhou-Jingning-Qianyang-Lueyang-Jiangyou, by using inversion.