

成县—西吉剖面地壳速度结构

李清河 郭建康 周民都 魏德晴 范兵 侯晓钰

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

天水地震区人工地震测深工程中成县—西吉测线南起甘肃成县，北至宁夏西吉，全长242公里，设4个炮点。对该测线资料解释的结果表明，该测线地壳可分为沉积层、上地壳、中地壳与下地壳四层。莫霍面从南向北逐渐加深，在水天—秦安附近M面上隆，中地壳顶部发现有低速层。与测线相交的西秦岭北缘断裂是一个超壳断裂，该断裂是祁连地槽与秦岭地槽的分界断裂。

一、震 相

1986年，国家地震局DSS协调组在甘肃省东部地区进行的8609工程中，其I测线南起成县，北至宁夏西吉，全长242 km。设四个炮点：成县、平南、秦安、西吉。观测系统见图2—2。上述各炮中，秦安炮(210°)激发效果不好，对控制中间层有一定影响。图6-1为成县—西吉测线综合时距曲线图。

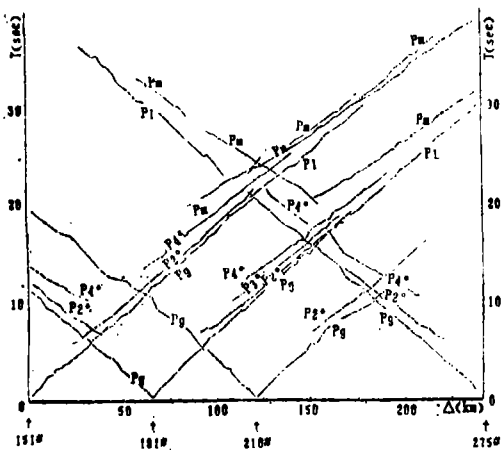


图 6—1 成县—西吉测线综合时距曲线图
Fig. 6—1 Composite traveltime-distance curves of profile II

本测线发现下列震相波组：

1. P_g 波，接收段为 $5 < \Delta < 120$ km，初至波的特点是识别简单，走时准确，其视速度在近炮点一段随着距离增大而增大。过了4.4—6 km之后，便渐趋于常数，达5.7—6.21 km/s，由走时曲线看，在小于5—10 km范围内可视作浅层回折波，当它渐趋于临界位置后，便成为在古老变质岩或结晶基底顶部的首波了。

2. P_2^0 波，各炮均可收到此波。在 P_g 波后面有一组波，它与 P_g 波的到时差在0.28—1.78秒不等，炮检距小时，走时差大，远时则小，其走时曲线呈双曲线型，视速度在6.13—9.8 km/s范围内随炮检距增大而减小，根据视速度差异，可分为几个段处理。

视周期一般在0.05~0.1秒之间,在26~120km之间一般可连续追踪,经反演,认为此波组是上地壳某层位的反射波。

3. P_2^0 波,此波在181°北支可接收到,该波接收段一般在43~101 km之间。与 P_2^0 的走时差在0.55~1.14秒之间。此波视周期一般在0.12~0.2秒之间,视速度在6.3~8.8km/s之间呈递减趋势,稳定在6.3~6.4km/s之间。该波振幅在前段较之 P_2^0 为小,但越远振幅越大,到100 km以远,该振幅明显大于 P_2^0 波。经反复正反演,确认该波是上地壳低速层底面反射波。

4. P_4^0 波,该波组接收距离一般为34~140 km之间,各炮不等。此波在65~85 km之间振幅最强。其视周期在0.12秒左右比较稳定,其视速度亦呈递减,在6.8~8.0 km/s之间变化,但稳定在6.8~7.0 km/s之间,走时曲线呈双曲线型形态。经正反演,认为是中地壳下界面上的反射波。

5. P_m 波,这是莫霍面的强反射波。151°、181°、275°三炮可收到,在110~120 km之间振幅最大。反向延伸可到85~90 km,正向到180 km左右,视周期在0.16~0.2秒之间。151°炮的 P_m 波到170 km以远时能量变化较大,强振幅不强,从反演结果看,这是一个与地震有关的区域,不仅莫霍面形态与其它段不一样,而且中、上地壳里存在低速层。此外, P_m 波各段走时连续不十分好,这可能是界面倾斜,或有一些深大断裂之故,也说明了速度横向不均匀性较强。

6. P_n 波,本地区地壳较厚, P_n 波作为初至波仅可在210~220 km以远才能接收到。故 P_n 作为初至有效观测段仅20~30 km,但从 P_m 大振幅作为干涉点来计起,仍可在续至区内追踪出部分 P_n 波来,其视速度在7.8~8.0 km/s之间。

7. P_m' 波,151°号炮在191~239 km间发现一组强波,其走时类似于 P_m 波,但与 P_m 无法衔接。经正反演,认为该波是下地壳的回折波,视速度为6.3~6.47km/s,回折点深度为24.3 km至35 km。

各炮各波接收距离见表6—1。

表6—1

I 测线各炮各波接收距离(公里)

炮	P_2^0	P_4^0	P_m	P_n
成县北支	23.45-120.90	61.11-159.30	86.09-187.32	203.19-287.85
平南南支	26.18-64.80	33.60-64.84		
平南北支	26.97-108.10	43.86-126.34	87.72-164.15	
秦安南支	28.27-97.70			
秦安北支	29.45-90.10	34.87-90.10		
西吉南支	21.07-72.10	24.14-113.66	87.27-182.76	212.68-240.84

二、解释方法

本研究中主要采用下列方法解释资料。

1. 高程校正：对于折射首波，我们采用下式校正：

$$\delta t_a = \Delta h \left(\frac{1}{V_1 \cos i_0} - \frac{\operatorname{tg} i_0}{V_2} \right) \quad (1)$$

式中 δt_a 为校正时间量， Δh 为测点与参考面上高差， V_1 为 Δh 所在处之沉积层速度， V_2 为层下基底界面速度， i_0 为出射角。

2. 沉积层校正：对于反射波，由 x^2-t^2 求得的RMS速度，作为校正参考的速度值，利用一段的时距曲线求得的平均深度作为参考深度。用下式求之：

$$\Delta t = (z_i - z_0) \cdot \sec \alpha \left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right)$$

$$\alpha = \operatorname{tg} \frac{x}{2H} \quad (2)$$

V_1 为沉积层速度， V_2 为未校正时计算的RMS速度， z_i 为测点沉积层厚， z_0 为炮点沉积层厚，再以 Δt 校正后重新求出新的 V 与 H 来。

3. 首波的反演：用截距时方法，基底首波采用相遇时距曲线方法。

4. 反射波，首先考虑假定上覆层为均匀层的情况，用 x^2-t^2 法和Giese公式^[1]求之。我们在解释中充分考虑了时距曲线的差异，在确认为一组波的前提下，把具有明显差异的时距曲线分段处理。反射点深度的跳跃，则从复查震相入手，最终确认之。至于层速度，则用Shah公式^[2]求得。

5. 深度—速度连续关系的确定：初至区在100 km以内一般认为是基岩首波或基底弱梯度回折波，事实上，可以用Herglotz—Wiechert方法求出 $Z-V$ 关系来。不过，由于走时视速度的变化，会出现深度与速度逆转的现象。为满足 $H-W$ 结合条件，要仔细核对走时数据，在确认反走时时，用Gervert-Markushevitch公式^[3]或McMechan方法^[4]求之。

6. 一维模型的阻尼最小二乘反演，利用广义逆矩阵奇异值分解方法求之。

7. 一维射线追踪，进一步判断波出现的类型及区间，通过试错，调整修正模型。

8. 二维射线追踪及合成地震图。二维初始模型用内插法建立，采用seis81程序进行二维射线追踪和理论地震图的计算，并计算了速度等值线。

三、成县—西吉剖面地壳结构特点

图6—2为成县—西吉剖面深部结构，图中给出了由不同炮求得的反射点位置和横向层速度。图6—3为该测线二维射线追踪，图6—4为成县炮理论走时与实测走时，理论地震图与实测地震图对照。图6—5为成县—西吉剖面深部速度等值线。

本区地壳可分为沉积层及上、中、下地壳四层。

1. 基底。据梁中华等^[5]和张生源等^[6]的研究，成县—西吉剖面从西吉到威戎基底埋深为1.7—2.6公里，其中静宁附近为一沉积盆地，厚度约2.6公里，在仁大与雷大之间，有一

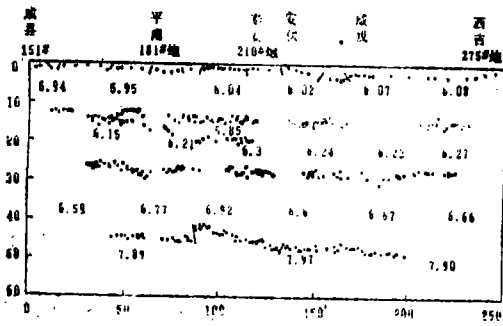


图 6—2 成县—西吉剖面深部结构
Fig. 6—2 1-D crustal structure of profile II

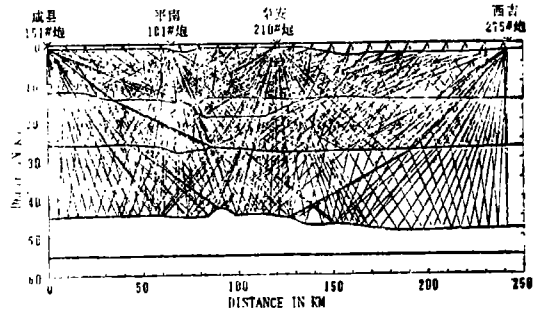


图 6—3 成县—西吉剖面二维射线追踪
Fig. 6—3 2-D ray tracing map of profile II

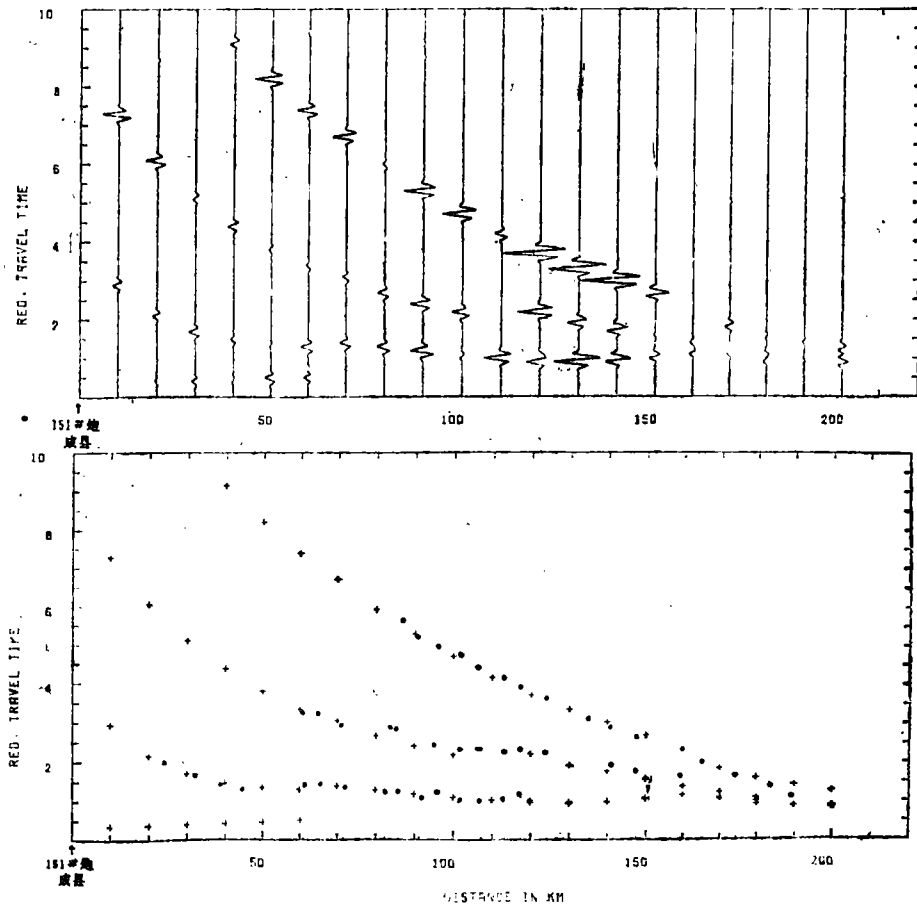


图 6—4 成县炮理论走时、实测走时及理论地震图
Fig. 6—4 2-D theoretical traveltimes, synthetic seismograms and reduced traveltimes of 151° shot in profile II

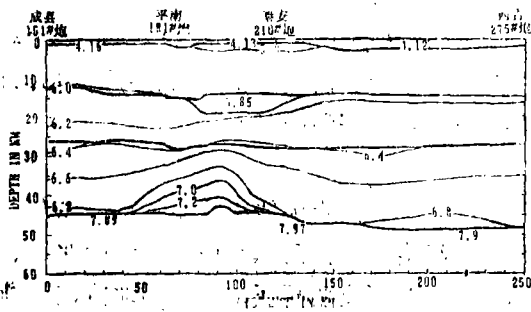


图 6—5 成县—西吉剖面深部速度等值线
Fig. 6—5 2-D isovelocity curves of profile II

单元一样，该地区古生代泥盆系即为基底，按波速划分，其基底厚度一般在 1 公里左右，沉积层速度为 4.15km/s，界面波速则在 6.0—6.08km/s 之间。

2. 上地壳全线埋深变化不大，在 12.4—15.6 公里之间，南端从成县到黄渚一带埋深较浅，为 12.4 公里，层厚为 11.4 公里。由黄渚向北到天水南皂郊一带界面变深，为 14 公里到 15.6 公里，层厚为 13—14 公里。由此向北界面基本平坦，层厚亦较一致。P₀ 波反映的平均速度与层速度亦有变化，从成县到天水南 P₀ 波平均速度为 5.79—5.83km/s，上地壳层速度为 5.94—6.01km/s。天水到西吉，P₀ 波平均速度为 5.84—5.92km/s，层速度为 6.01—6.08km/s。天水至秦安以北安伏一带 P₀ 波平均速度最高，为 5.89—5.92km/s。I 测线 P₀ 波全线平均速度为 5.84km/s。

3. 由 P₀ 波构成的中地壳埋深在 26.2 公里至 28 公里之间变动，其中平南与天水之间略深一些，中地壳层厚为 12.2—14 公里。以天水南皂郊为界，其南部 P₀ 波平均速度较小，约为 5.96—5.99km/s，中地壳层内平均速度为 6.12—6.21km/s，皂郊以北则 P₀ 波平均速度较大，约为 6.01—6.10km/s，中地壳层速度也较大，为 6.21—6.30km/s。其中尤以天水至秦安北安伏一带为高。I 测线全线 P₀ 波平均波速为 6.02km/s。

4. 由 P_m 波构成的莫霍面埋深一般在 43—49 公里，总趋势是南浅北深。从成县到平南 M 面变化不大，在 44.5—45 公里之间，平南至天水由 44.5 公里略下降到 45 公里左右。但从天水至渭南一带，M 面上隆，埋深仅有 43 公里，再向北，逐渐下降，到秦安以北的安伏一带，已下降到 47 公里。从安伏到西吉，继续缓慢变深，最深处达 49 公里。下地壳厚度南部成县一带为 19 公里，北部西吉约为 21 公里，但中间从平南至秦安一带较薄，为 17 公里左右。P_m 波平均速度反映在成县至平南一带较低，为 6.24—6.28km/s，相应下地壳层速度也较低。此段为 6.59—6.77km/s，中间部分，即平南、天水至秦安北安伏一带，P_m 平均速度较高，为 6.35—6.38km/s，相应层速度为 6.60—6.90km/s。此段 M 面上隆。北部 P_m 平均速度为 6.28—6.32km/s，下地壳层速度为 6.60—6.66km/s。值得一提的是，在天水至秦安间，上、中、下地壳均呈现上隆趋势，且各层地震波速度均偏高。由 P_m' 波反演出下地壳梯度较大，约 0.03。

5. 中地壳内低速层。由平南炮记录中可以发现 P₀ 波，经反演认为反映了中地壳顶部的低速层。在天水—秦安一带该层下界面为 19—20 公里，层厚约 3—5.5 公里，层内速度为 5.85 km/s。虽然成县炮、秦安炮及西吉炮该波组追踪不连续，但是从 P₀ 波速度较低，中地壳层速度亦较低来看，很可能该测线全线存在低速层。

盆地，其最大厚度可达 4 公里。在仁大至秦安间，基底厚度逐渐变浅，最浅处仅有 0.8 公里左右。地表地质此处个别地段有基性岩出露。秦安至西吉间沉积层速度为 4.13km/s，界面速度为 5.93km/s。秦安—天水—平南一带基底比较复杂，地层褶皱强烈，此段基底较薄，一般厚 1 公里左右。位于西秦岭北缘断裂带上的天水市，被几个程度不同的断裂分割，基底厚度约 2—3 公里，北缘断裂以南进入秦岭山地。与 I 测线相同构造

6. 上地幔顶部滑行速度。由于测线短, 只追踪了少量 P_n 数据, 按从 P_m 与 P_n 干涉点计起, 又在续至区寻找 P_n 震相, 依此为基础, 算得两边 P_n 速度为: 南端约 7.89 km/s , 北端为 8.0 km/s 。参照各段地壳平均速度, 分别求得的天水北渭南、西坪一带地壳厚度为 43.34 km , 秦安北安伏一带地壳厚度为 47.77 km , 与利用反射波所求基本相符。

7. 断裂问题

(1) 浅部断裂 南北带北段地质构造十分复杂, 成县—西吉测线中有秦岭褶皱系与祁连褶皱系, 中间又有次级褶皱带。从南向北依次分布有江洛、麻沿河、平南、西秦岭北缘、清水—马衔山及会宁—张家川断裂。这些断裂大体上呈近东西或北西西, 由南向北方向逐渐呈略向北倾斜。

(2) 深部断裂 西秦岭北缘断裂。此断裂在天水南与测线相交。由 P_2^s 波构制的上地壳界面、 P_2^s 波构制的下地壳界面对此断裂均有反应。 P_2^s 的中地壳界面南侧埋深约为 15.6 km , 北侧埋深为 14 km , 下地壳界面南侧为 27.5 km , 北侧为 26.5 km , 莫霍面在北缘断裂北侧有一隆起, 埋深为 $424-2.5 \text{ km}$, 而南侧则可深达 45.5 km , 可见北缘断裂为一超壳断裂。从速度看, 北缘断裂北侧隆起处下地壳层速度可达 6.9 km/s , 而其南侧则为 6.77 km/s , 北缘断裂在 I 测线上反映为 80° 倾角, 可近似为直立断层。

四、结 论

我们对成县—西吉剖面进行了地震波速度结构反演, 获得了该测线地壳速度结构及深部构造的一些主要结果。

1. 本测线范围内地壳可分为沉积层、上地壳、中地壳与下地壳四层。沉积层厚度为 $1-3.5 \text{ km}$ 之间, 起伏颇大, 沉积层波速为 $4.13-4.15 \text{ km/s}$, 基底界面速度为 $5.83-6.08 \text{ km/s}$ 。上地壳埋深变化不大, 在 12.4 km 与 15.6 km 之间, 平均层速为 $5.9 \text{ km/s}-6.08 \text{ km/s}$ 。中地壳埋深为 26.2 km 至 28 km , M面呈南浅北深趋势, 在天水至秦安间上隆, 最浅仅 43 km , 西吉为 49 km , 秦岭地槽内波速低些, 为 $6.59-6.77 \text{ km/s}$, 祁连地槽为 $6.6-6.9 \text{ km/s}$, 天水—秦安间最高。

2. 在埋深为 14.8 km 向下达 $19-20 \text{ km}$ 深, 存在一个低速层, 层速为 5.85 km/s , 尤以天水—秦安间该层速度最低。

3. 西秦岭北缘断裂为一超壳断裂, 沿北西西和北西向分布有若干条浅层断裂。

参 考 文 献

- [1] P. Giese等, 欧洲中部爆破地震研究, 国家地震局地球物理勘探大队译, 地震出版社, 1983.
- [2] Shah, P. M. and Levin, F. E., Gross Properties of timedistance curves, *Geophysics*, Vol. 38, 643-656, 1973.
- [3] Gerver, M. and Markushevitch, V., Determination of a seismic wave velocity from the travel-time curve, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 13, 241-246, 1966.
- [4] McMechan, G., Low-velocity zone inversion by the Wiechert-Herglotz integrat, *B. S. S. A.*, 69, 379-385, 1979b.
- [5] 梁中华等, 天水地震区地壳浅层速度结构, 本文集.
- [6] 张生源等, 天水地震区浅层地质构造, 本文集.

THE VELOCITY STRUCTURE OF CHENGXIAN-XIJI PROFILE

Li Qinghe, Guo Jiankang, Zhou Mindu, Wei Deqing,
Fan Bing and Hou Xiaoyu

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB*)

Abstract

The Chengxian-Xiji profile of DSS in Tianshui earthquake area is from Chengxian country of province Gansu to Xiji country of Ningxia Hui Autonomous Region, the total length of profile is 242km with 4 shots. The crust can be divided into four layers: sedimentary, upper crust, middle crust and down crust. The deep of Moho increase gradually from south to north, and it rises in the vicinity of Tianshui-Qinan. The low velocity layer (LVL) was found in the top of middle crust. The northern fringe fault of western segment of Qinling Mountain across to the profile is a over-crust fault and it is a boundary fault between Qilian and Qinling Geosyncline.