

永登系列爆破甘宁青地区地震台网的观测解释与地壳结构

张 诚

赵 坤

(国家地震局兰州地震研究所) (青海地震局)

摘 要

1982—1983年在甘肃永登地区进行了系列人工大爆破,本文分析研究了甘宁青地震台网的观测记录,求得各种波的平均速度为: $V_{p_1} = 6.00$ 公里/秒, $V_{p_2} = 3.56$ 公里/秒, $V_{p_3} = 8.16$ 公里/秒, $V_{p_4} = 4.54$ 公里/秒。表层直达纵波速度 $V_0 = 4.82$ 公里/秒。莫霍界面上的反射波 P_M 在140—180公里范围比 P_1 波强10—7倍。并获得该地区的地壳厚度为:(1)甘肃北山的河西堡—高台一带为48.3公里。古浪—张掖—嘉峪关的河西走廊一带为50.2公里。祁连山南麓为53.6公里。(2)青海中南部为54.4公里。(3)甘肃东部的礼县—武都地压为48.7公里。定西—岷县—通渭地区为50.5公里。(4)宁夏六盘山区为51.6公里。六盘山西侧的甘肃静宁为48.6公里,东侧的平凉为47.5公里,东南端的陕西宝鸡为46.1公里。以上的地壳厚度分布显示了青藏高原地壳在东北边缘的递减,以及甘肃东部地区地壳的某些起伏。

1982年6—7月“77”工程在甘肃永登县马家坪进行大爆破,其间国家地震局“7782”工程在永登—渭南测线上进行爆破,在测线西段有甘肃平凉、宁夏西吉和青海门源爆点。1982年11月和1983年7月,永登县水泥厂进行了采石大爆破。上述这些爆破我们统称永登系列爆破。本文进行台站观测解释,并计算了甘宁青地区的地壳结构。

一、爆破参数和观测

永登系列爆破在测线西段共有八次,它们的参数列于表1(爆点示于图5)。在永登县附近有四次,是地震台站观测的主要对象。1982年6月2日和7月1日的马家坪爆破都在黄土山洞中,洞底面与洞外地面平齐,炸药分别为TNT60吨和153.6吨,都以长立方体放置,与洞壁间隙约1米,洞口简易封闭,一次起爆。1982年11月5日和1983年7月1日水泥厂爆破,炸药为2号硝铵224吨和216吨,多药室微差起爆,以松懈石灰山岩体。前一炮起爆药量

为200吨,滞后200毫秒药量为24吨。后一炮起爆药量为47.2吨,滞后310毫秒药量为142.9吨。再滞后650毫秒药量为25.9吨。门源爆破炸药为硝铵3吨,炮源为竖井集、砂岩。平凉和西吉炮药量都为TNT 2吨,炮源为黄土。以上各次爆破起爆时刻用SC—16示波仪和长城磁带仪並测,精度为0.01秒。

永登系列爆破参数

表1

起爆时刻				爆源位置			
年	月	日	时分秒	纬度	经度	高程	地名
82	5	25	22 00 12.170	35° 35' 42.74"	106° 35' 54.0"	1442(米)	平凉
	6	2	00 00 27.403	37 36 6.81	101 21 20.0	3200	门源
	6	2	12 00 5.010	36 39 0.3	103 24 19.8	2055	永登
	6	11	00 00 14.672	35 58 27.12	105 26 18.0	1886	西吉
	6	16	00 00 21.404	35 35 44.38	106 35 46.0	1442	平凉
	7	1	12 00 5.659	36 38 58.8	103 24 28.7	2050	永登
	11	5	12 00 10.863	36 54 2.28	103 13 10.02	2800	永登
83	7	23	12 00 11.454	36 54 04.2	103 13 18.0	2800	永登

甘宁青地区地震台站有50多个,甘肃东部及宁夏西海固地区分布较密(图5)。各台观测系列爆破主要由短周期仪承担,放大5万倍左右,为可见记录,时间服务可准到0.2秒。多数台站观测到永登四次爆破,尤以1982年11月5日永登石灰岩炮源观测波形最为清晰,最大观测距离约600公里(图1)。最大水平地动位移随距离的分布见图2,有些点子偏离较大,如靖远、天水台的点子,是由于台基为(风化红砂岩和黄土)放大效应所致。若取花岗岩、红砂岩、黄土的地动位移值比为1:2:5.6^[5],将它们的位移归一为花岗岩的位移,在图上用矢线指出,结果较好。震中距大于300公里时,衰减系数增大一个数量级。其他各炮因微差起爆、黄土吸收效应、空腔效应和能量向空中逸出等因素,激发条件较差,观测质量次之。

二、资料与解释

甘宁青地震台网分散在系列爆破点周围辽阔的地区内,在方位上、距离上自然分布都极不均匀,多数台站纵横于青藏高原、阿拉善台块和鄂尔多斯台块的边缘地带,还有青海极少台站深入青藏高原内部。该地区地质构造复杂,差异性较大,各台观测到的波类和相位特征不尽相同。又由于各台的记录走速不够高,各种相位间隔没有足够的拉开,所以,解释这组台网的爆破记录图,不象解释勘探线记录那么容易,不能连续追踪与地壳细结构相关的波,只能分析与主要分层相关的波。我们解释波采用四条标准:(1)相位的初至清晰,时刻可靠;(2)相位的振幅和周期差异明显;(3)对震相不作无验证的取舍;(4)作时距曲线以其特有的规律检验和追踪各种波。经过反复对比后,确定了 P_s 、 P_m 、 P_n 和 S_s 、 S_m 、 S_n 等波,并得出各种波的时距曲线,时距方程参数列于表2。平均速度 $V_{ps} = 6.00$ 公里/秒, $V_{ps} = 3.56$ 公里/秒; $V_{pn} = 8.16$ 公里/秒, $V_{pn} = 4.54$ 公里/秒。另外,由地震台和测线距

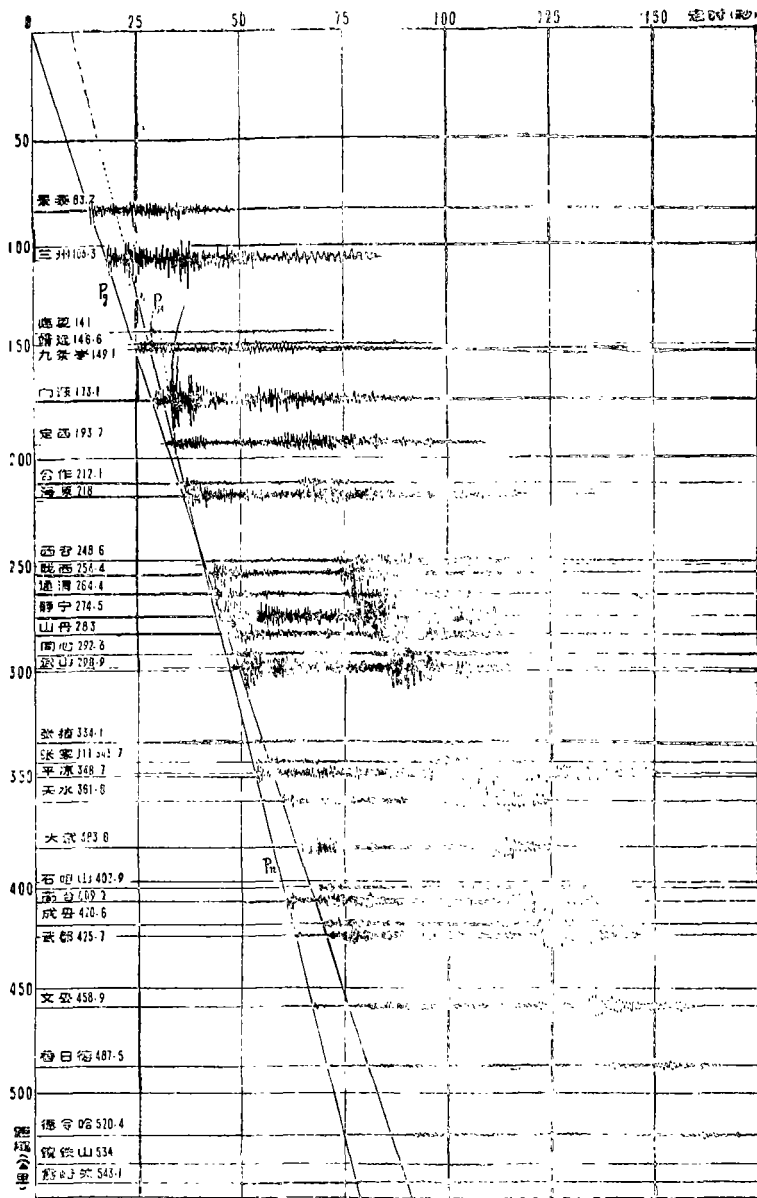


图 1 永登大水泥厂爆破记录图

Fig. 1 The recording diagram of explosion in Great Cement plant, Yongdeng County.

离小于19公里的直达纵波求出地表浅层平均速度 $V_0 = 4.82$ 公里/秒。

永登四次爆破的 P_1 与 P_2 时距曲线给出它们的平均干扰距离为242公里，小于这个距离 P_2 波后到，而且与 P_1 波有干扰距离段。

图 1 各台的放大倍率是不同的，由同台不同波的振幅比可以看出波的强弱。 P_1 波当 $\Delta > 250$ 公里时，振幅是随距离增加而弱减， $\Delta > 270$ 公里时， P_2 又增强。显然，200—290公里范围有回折波、 P_2 波的迭加，波形复杂。 P_2 波在140—180公里比 P_1 波强约10—7倍。 P_1 波一般

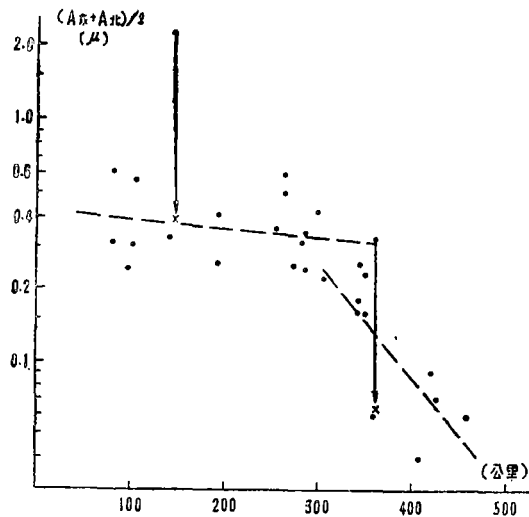


图2 1982年11月5日永登爆破各台的水平最大地动位移分布
Fig. 2 Distributions of maximum horizontal displacement of earth motion in every station for the Yongdeng explosion on Nov. 5, 1982.

表2 各种波的时距方程 $t = a\Delta + b$ 的参数

日期	波名	a	b	v	n
82.6.2	Pg	0.1702	0.2855	5.88	13
	Pn	0.1218	11.9849	8.21	12
	Sg	0.2861	0.2625	3.50	14
6.11	Pg	0.1677	0.4896	5.96	24
	Pn	0.1175	10.8158	(8.51)	8
	Sg	0.2805	2.5292	3.57	22
7.1	Pg	0.1635	2.0722	6.12	23
	Pn	0.1218	11.9833	8.21	19
	Sg	0.2802	2.7901	3.57	18
	Sn	0.2233	16.3305	4.48	4
11.5	Pg	0.1632	0.7936	6.13	40
	Pn	0.1255	9.6059	7.97	30
	Sg	0.2783	1.2631	3.59	34
	Sn	0.2230	14.5550	4.48	20
83.7.23	Pg	0.1690	0.3528	5.92	31
	Pn	0.1212	11.8330	8.25	18
	Sg	0.2820	1.4533	3.55	28
	Sn	0.2146	18.5170	4.66	8

都比 P_n 波弱, 但是, $\Delta = 348.7$ 公里的平凉台及 $\Delta = 409-488$ 公里的 P_n 波都较强。

在 $\Delta = 106.3$ 公里的兰州台记录上 (图₁), 明显看出 P_n 后 4.0 秒出现一强的纵波性质震相, 它可能是地壳内某层上的反射波。这个波在距离相近的其它台记录上也比较常见。

对永登马家坪和水泥厂的时距曲线对比后发现, 两曲线不重合。由表 2 看出, 11月 5 日、7 月 23 日与 7 月 1 日的 P_n 时距曲线纵轴截距差为 1.28 和 1.72 秒。从两炮源的观测走时差与理论走时差比较, 也可看出上述结果。

理论走时差为:

$$\sigma t_{理} = \sigma \Delta / 6.02,$$

$\sigma \Delta$ 为距离差, 取 $V_{P_n} = 6.02$ 公里/秒。计算结果列于表 3 和表 4, 两炮的观测走时差比理论走时差小, 平均为 1.44 和 1.28 秒。两炮

的结果平均为 1.36 秒。计算浅层理论走时取波速 6.02 公里/秒已够偏高, 所以, 观测走时差比理论走时差小的数值, 显然是由于马家坪黄土炮源和松散砾石层的走时大引起的。马家坪炮源为黄土山包, 下面黄土层厚约 50 米, 再下面是松散砾石层, 厚度尚不明确, 层中波速较

小，走时较大，时距曲线偏高。水泥厂炮源为石灰岩，波速高走时小，曲线偏低。

表3 11.5与7.1爆破Pg波理论与观测走时差之差

台名	$\sigma_{t观}$	σ_{Δ}	$\sigma_{t理}$	$\sigma_{t理}-\sigma_{t观}$
盐池(兰)	3.80	32.48	5.40	1.60
兰州	4.0	30.90	5.13	1.13
刘家峡	3.10	26.81	4.45	1.35
景泰	-2.3	-1.97	-0.33	1.97
临夏	2.7	27.07	4.50	1.80
靖远	2.2	17.9	2.97	0.77
平均				1.44秒

表4 7.23与7.1爆破Pg波理论与观测走时差之差

台名	$\sigma_{t观}$	σ_{Δ}	$\sigma_{t理}$	$\sigma_{t理}-\sigma_{t观}$
兰州	4.1	32.4	5.38	1.28
景泰	-1.79	-2.0	-0.33	1.46
临夏	3.09	27.0	4.49	1.40
靖远	2.01	17.84	2.96	0.96
平均				1.28秒

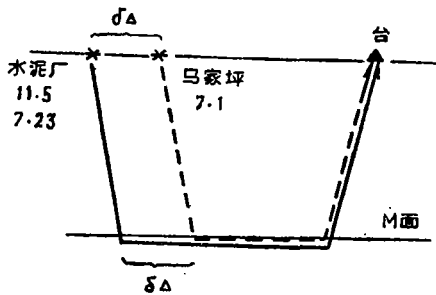


图 3

马家坪黄土炮源效应对P_n波走时的增加，也可由上述方法求得(图3)。取V_{p_n} = 8.17里/秒，计算结果列于表5和表6，理论走时差与观测走时差的差值平均为0.74秒。

表5 1.15与7.1爆破Pn波理论与观测走时差之差

台名	$\sigma_{t观}$	σ_{Δ}	$\sigma_{t理}$	$\sigma_{t理}-\sigma_{t观}$
静宁	2.5	28.89	3.54	1.04
岷县	3.9	38.51	4.71	0.81
隆德	2.0	27.33	3.35	1.35
甘谷	3.3	32.21	3.94	0.64
山丹	-4.6	-32.02	-3.92	0.68
礼县	3.0	32.54	3.98	0.98
平凉	2.7	26.96	3.30	0.60
成县	2.7	32.50	3.98	1.28
武都	3.1	32.17	3.94	0.84
冯家山	2.6	29.60	3.62	1.02
宝鸡	2.1	30.23	3.70	1.50
平均				0.98秒

表6 11.5与6.2爆破Pn波理论与观测走时差之差

台名	$\sigma_{t观}$	σ_{Δ}	$\sigma_{t理}$	$\sigma_{t理}-\sigma_{t观}$
西吉	2.45	25.79	3.16	0.71
静宁	3.45	28.73	3.52	0.07
岷县	2.85	31.06	3.80	0.95
隆德	2.75	27.17	3.33	0.58
甘谷	3.45	32.10	3.93	0.48
平凉	2.95	26.79	3.28	0.33
文县	3.45	31.27	3.83	0.38
平均				0.50秒

三、地壳结构

由永登系列爆破观测记录分析的各种波中，纵波最清晰，到时精度高。我们用P_g、P_M、

P_n 波求其相关的地层厚度。取地层为水平层,各层中的波速是均匀的。采用下面的公式计算各层的厚度。

$$\Delta = 111,199 [(\varphi_s - \varphi_o)^2 + (\lambda_s - \lambda_o)^2 \cos^2 \frac{1}{2}(\varphi_s + \varphi_o)]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$H_1 = (t_k - \frac{\Delta_k}{V_2}) / 2 \sqrt{\frac{1}{V_1^2} - \frac{1}{V_2^2}}, \quad (2)$$

$$H_2 = t_o / 2 \sqrt{\frac{1}{V_1^2} - \frac{1}{V_2^2}}, \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} t_k &= t - (\delta H_1 + \delta H_2) \frac{V_2}{V_1 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}, \\ \Delta_k &= \Delta - (\delta H_1 + \delta H_2) \frac{V_1}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$H_R = \frac{1}{2} \sqrt{(V_R t_k)^2 - \Delta_k^2} \quad (5)$$

式中 φ_s 、 λ_s 和 φ_o 、 λ_o 分别为台站和炮点的纬度和经度,观测距离 Δ 以公里为单位。 H_1 为单测点求得的地层厚度, H_2 为折射波时距曲线求得的地层厚度, H_R 为层底的反射波求得的地层厚度。 t_k 和 Δ_k 为疏松层或台站高程改正后的波走时和距离, V_1 是层中波速, V_2 是第二层顶的波速, t_o 是时距曲线纵轴截距, t 是波的观测走时, δH_1 、 δH_2 是炮点和台站的疏松层或海拔高程, V_R 是反射波速。

1. 由 P_g 波求浅地层的厚度

取表2中 P_g 波时距曲线截距 t_o 值,层中波速 $V_o = 4.82$ 公里/秒,层底面下波速为6.02公里/秒,由(3)式算出永登—西吉一带的浅层平均厚约3.7公里。

2. 由 P_n 波求莫霍界面的厚度

甘宁青地区的海拔高程差异较大,最低为600米,最高为3700米,有的炮点和观测点存在波速较小的疏松层,用 P_n 波计算地壳厚度,应改正疏松层对走时的影响,对黄土层、砾石层的纵波速取0.35公里/秒、0.70公里/秒,对花岗岩层取6.02公里/秒, $V_{P_n} = 8.19$ 公里/秒。由(4)式归一为海平面的 P_n 时距方程参数列于表7。四炮的综合时距曲线见图4。

表7 以海平面为 $t = a\Delta + b$ 标准的时距方程的参数

日期	a	b	v	n
82.6.2	0.1221	11.3554	8.19	12
7.1	0.1217	11.4388	8.22	18
11.5	0.1244	9.7701	8.04	28
83.7.23	0.1219	11.0251	8.21	16
平均			8.16	
四炮综合	0.1215	11.1828	8.16	73

最后,用(2)式及地震观测资料获得的 $V_{P_n} = 8.17$ 公里/秒, $V_p = 6.09$ 公里/秒^[2],计算单测点的 P_n 线路上的地壳厚度值,加台站高程后的结果列于表8,示于图5。计算时,对6月2日、7月1日马家坪爆破的 P_n 走时扣除了炮源疏松层延时0.74秒。

3. 由 P_n 求反射点的厚度

用式(5),取 $V_{P_n} = 6.09$ 公里/秒, $V_R = 3.56$ 公里/秒,算出永登周围附近地区的一些厚度(表8,图5)。

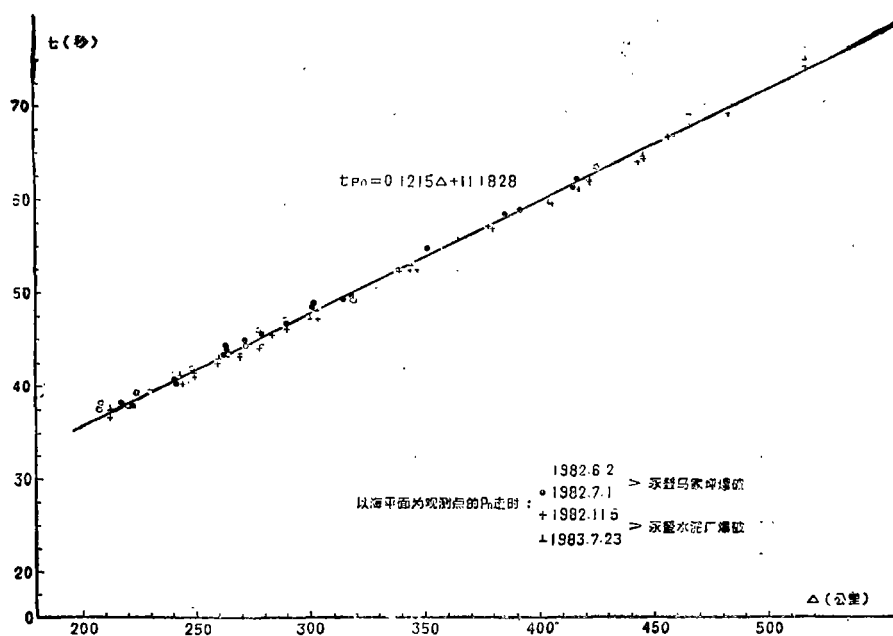


图 4 P_n 时距曲线

Fig. 4 The travelling-time curve.

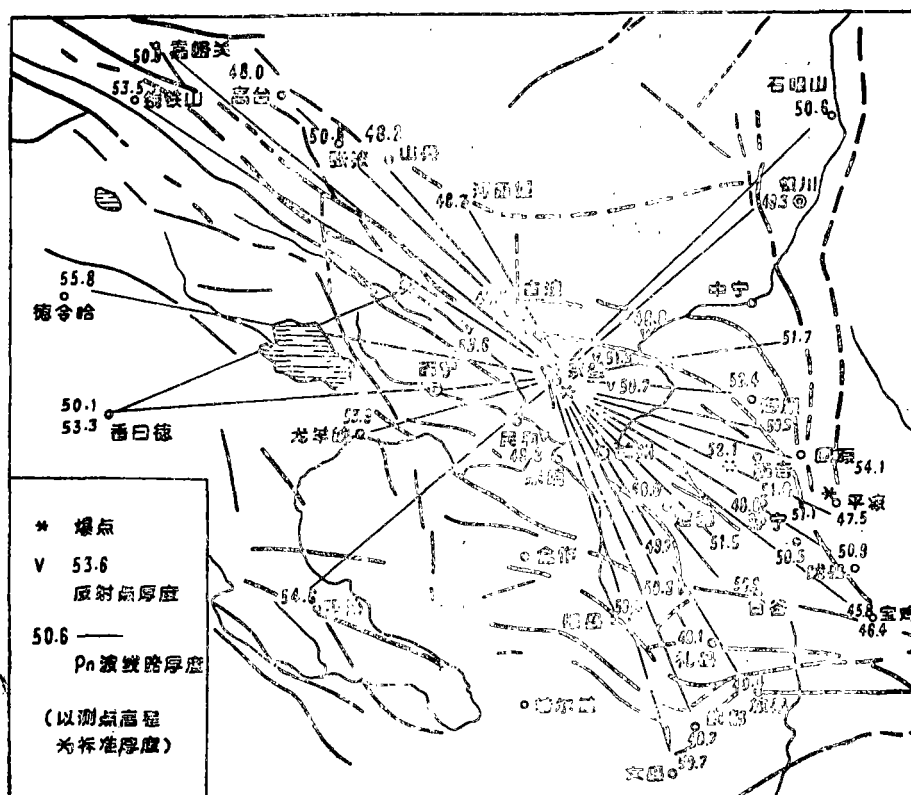


图 5

由反射波和折射波计算的地壳厚度值

8表

台名	H_n 6,2	H_n 7,1	H_n 11.5	H_n 7.23	\bar{H}	\bar{H} + 高程
景泰		49.65(H_R, P_m)	$H_R, (P_M) (S_M)$	$H_R, (P_M) (S_M)$	\bar{H}_R 49.65	51.3
临夏	46.31(H_R, P_m)		45.25 50.16	48.57 46.34	47.33	49.2
靖远			49.26	49.09	49.18	50.2
九条岭			47.82	47.41	47.25	49.5
门源			50.69	50.59	50.64	53.6
中卫				46.87 44.18	46.53	46.8
定西			H_n 48.1	H_n	H_n 48.1	50.0
海原			46.45	51.97	50.21	52.4
陇西	46.6		47.46	49.79	47.95	49.7
西吉	49.29		49.28	52.11	50.23	52.1
河西堡	47.96	46.08			47.02	48.7
龙羊峡	51.12				51.12	53.9
寺口子	48.61				48.61	50.3
静宁		46.95	45.86	47.77	49.86	48.6
通渭			48.26	51.1	49.68	51.5
岷县	49.27	47.81	47.28		48.12	50.4
固原		52.34			52.34	54.1
武山		48.49			48.49	50.3
隆德	47.85	52.33	48.40	49.40	49.50	51.6
甘谷	48.52	49.27	49.56	51.02	49.59	50.9
同心	51.43	49.92	49.44		50.26	51.7
泾源	49.49	48.89			49.19	51.1
张家川		47.08	49.58	49.66	48.77	50.5
银川				47.60	47.60	49.3
山丹		46.27	46.52		46.40	48.2
礼县		47.13	45.81		46.47	48.1
平凉	44.77	46.01	46.49	46.57	46.96	47.5
陇县		51.16	48.48		49.82	50.9
大武台			50.81		50.81	54.6
高台			46.13	47.01	46.62	48.0
石咀山			49.34		49.34	50.6
成县		48.50	45.89	51.00	49.46	49.4
武都		48.11	47.47	47.10	47.56	48.7
冯家山		46.85	44.35		46.10	45.8
宝鸡			44.93	46.38	46.66	46.4
文县	49.12		50.47	49.50	49.70	50.7
香日德			47.10		47.10	50.1
德令哈			51.15	54.37	52.76	55.8
镜铁山			50.86		50.86	53.5
嘉峪关			49.17		49.17	50.9
张掖			49.53	48.60	49.07	50.6
香日德	50.32	(门源地)			50.32	53.3

四、讨论和结语

从表8和图5可以看出甘宁青地区地壳厚度分布的概貌，数据虽不如小块地震勘探那样精细，但是到目前为止，是这一辽阔地区内实测的数据最丰富的结果。归纳这些资料可以得出这一地区的地壳厚度：（1）甘肃北山的河西堡—高台一带为48.3公里；古浪—张掖—嘉峪关的河西走廊一带为50.2公里；祁连山南麓为53.6公里。（2）青海中南部为54.4公里。（3）甘肃东部的礼县—武都地区为48.7公里；定西—岷县—通渭地区为50.5公里。（4）宁夏六盘山区为51.6公里。六盘山西侧的甘肃静宁为48.6公里，东侧的平凉为47.5公里，东南端的陕西宝鸡为46.1公里。（5）宁夏同心—石咀山一带约为49.5公里。

由测定的地壳厚度值作出图6的五条剖面：（a）北山—海原，（b）河西走廊—平凉，（c）祁连山—宝鸡，（d）青海中部—甘肃北山，（e）宁夏同心—甘肃文县。从这些剖面可以看出甘宁青部分地区地壳厚度的起伏。从祁连山横跨走廊到北山，地壳由厚度薄，南北100公里距离内的厚度减少约5公里。西海固地区差异显著，六盘山下与河西地区相近，东西两翼壳厚度突减，平凉—宝鸡地区地壳厚度减少了约4公里，形成我国东西地壳的分界线中的一段。从宁夏同心到甘肃的文县一带，礼县—武都地区地壳厚度也比周围薄。

上面给出的甘宁青地区的地壳厚度值，与以前的一些作者所得结果〔1、2〕稍有差异，在某些地区比文献〔3、4〕由重力资料反演的结果差异稍显著，比文献〔2〕的震源参数精度高，观测点的密度大，波射线覆盖的地区也更为广阔，获得的数据也较为合理。

王绒霞同志提供了宁夏台网爆破记录图，黄长林同志提供了陕西地区某些观测资料，在此特致谢意。

（本文1985年5月8日收到）

参 考 文 献

- 〔1〕曾融生、滕吉文等，我国西北地区地壳中的高速夹层，地球物理学报，Vol.14，№2，1965。
〔2〕张诚、张伶等，甘肃及邻近地区的地壳厚度，西北地震学报，Vol.1，№2，1979。

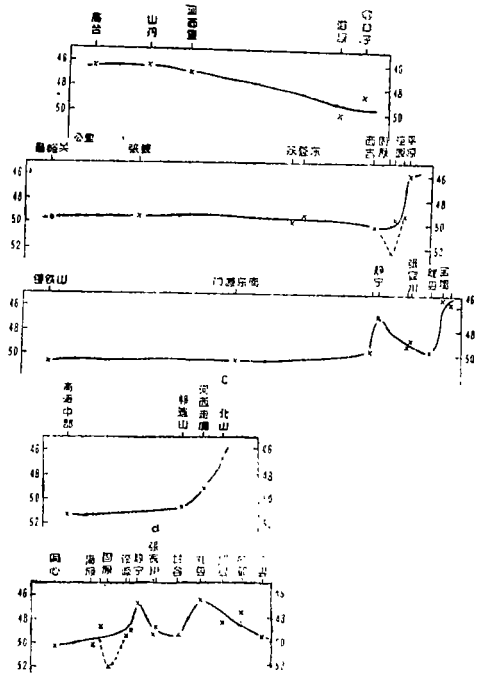


图 6

a. 北山—海原莫霍界面埋深剖面 b. 河西走廊—平凉莫霍界面埋深剖面 c. 祁连山—宝鸡莫霍界面埋深剖面 d. 青海中部—甘肃北山莫霍界面埋深剖面 e. 宁夏同心—甘肃文县莫霍界面埋深剖面

- [3] 梁桂培、陈爱玲等, 甘肃西部地区深部构造, 西北地震学报, Vol. 5, № 1, 1983.
- [4] 陈爱玲、赵淑兰等, 西海固地区构造应力特征及其与地震活动的关系, 西北地震学报, Vol. 3, № 1, 1981.
- [5] 张诚, 西北地区测定震级 (M_L) 中的某些问题, 地震地磁观测与研究, Vol. 2, № 3, 1981.

**INTERPRETATION TO THE OBSERVATIONAL DATA OF NETWORK
OF SEISMIC STATIONS IN GANSU, QINGHAI AND NINGXIA
FOR A SERIES OF EXPLOSIONS IN YONGDENG COUNTY
AND CRUSTAL STRUCTURE OF THE REGION**

Zhang Cheng

(*Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological
Bureau, Lanzhou, China*)

Zhao Kun

(*The Seismological Bureau of Qinghai Province*)

Abstract

A series of artificial explosions was made from 1982 to 1983 in Yongdeng County, Gansu Province. This paper deals with the data recorded by the stations in Gansu Province, Qinghai Province and Ningxia Hui Autonomous Region. The velocity of every kind of waves is calculated here: $V_{pg}=6.00\text{km/sec}$, $V_{sg}=3.56\text{km/sec}$, $V_{pn}=8.16\text{km/sec}$, $V_{sn}=4.54\text{km/sec}$. The velocity of surface longitudinal wave reaches $V_0=4.82\text{km/sec}$. The reflection wave P_m on Moho discontinuity in 104-180km is 7-10 times greater than P_g wave. The thickness of crust in this region is also gained: 1) Hoxibao-Gaotai, in Gansu, about 48.3km; Gulang-Zhangye-Jiayuguan Pass, 50.2km; the piedmont of Qilianshan Mountain, 53.6km. 2) The middle part and south of Qinghai, 54.4km; 3) Lixian-Wudu, in the east of Gansu, 48.7km. Dingxi-Minxian-Tongwei, 50.5km. 4) Lioupanshan Mountain region, in Ningxia, 51.6km; Jingning, in the west of Lioupanshan Mountain, 48.6 km; Pingliang, in the east of Lioupanshan Mountain, 47.5km; and Baoji, in the southeast of the mountain, 46.1km. It is clear that there is a descend in the edge of northeast of Qinghai-Xizang plateau, by the distribution of crustal thickness mentioned above, but a fluctuation in the eastern area of Gansu Province.