

天水地震区地壳结构特征

李清河 闵祥仪

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文在对天水地震区人工地震测深资料解释的基础上,系统地分析和归纳了该区基底特点、深部速度结构特点、断裂特点和大地构造特点,获得了对该区由浅到深、从地球物理到地质、从地壳结构到大地构造及其形成较全面较深刻的认识。

由纵测线、非纵测线、基底、浅部地质的解释结果及其它地球物理探测结果^[1-5],对本区深部构造特点可以获得以下几方面的认识。

一、基底特点

由Pg波解释获得的基底以上浅层结构与浅部地质解释的结果大同小异。由图3-2、4-2可见,鄂尔多斯地台区上部有较厚的第四系黄土、第三系、中生代白垩系地层,之下为震旦系,且各层基本上为水平沉积。按大地构造单元分类,地台区为前震旦系顶面,故地台区基底厚度在2公里至5.5公里之间,地球物理解释与地质解释结果基本一致。沉积层内的P波速度在地台区为4.16km/s,而作为基底顶面的Pg波速度为5.81km/s,在I测线六盘山—陇山以东至陇县间,沉积层出现了剧烈褶皱,其地表已出现了白垩系与奥陶系地层,之下便是元古界的前震旦系,基底仅约1.5公里左右厚,地质上确认固关附近有一倾向南西的断裂,被认为是鄂尔多斯西缘断裂与海原—六盘山断裂的重接复合,是中朝准地台与祁连褶皱系的分界。应该指出,此断裂在地表显示为西侧抬升,东侧下降,这是因为地表褶皱的结果,导致西侧显露了2—5公里宽的前寒武系地层,而此地层中波速又颇高,故地质与人工地震解释均为此结果。但是在此厚约500米的地层之下,并无更古老地层显示,而位于东侧的地台区则已显示了巨厚的古老的前震旦系地层,故从基底来看,此断裂应为正断层。

I测线上祁连褶皱系基底变化很大,六盘山—陇山以西到中山镇一带,基底厚度一般在1.6—2.4公里之间,沉积层波速为4.22km/s,界面速度为5.9km/s,而在秦安县城东西两侧,基底埋深仅在1.2—1.4公里之间,波速也有所提高,沉积层速度为4.31km/s。基岩界面速度则为6.01km/s。以I测线上清水—马衔山断裂为界,其东西两侧差异颇大,东侧至秦安间基底较浅,个别地段仅埋深几百米,西侧即甘谷与武山间埋深较东侧为厚,一般为2.0公里左右,在西秦岭北缘断裂以西到58°炮点之间,约25公里长范围内,沉积了较厚的石炭—泥盆地层。

I 测线上武山以西属秦岭褶皱系, 基底变化较祁连褶皱系为小, 该褶皱系的古生代泥盆纪沉积很厚, 但由于普遍发生了区域变质, 形成一套中深变质岩系, 其岩性已与中朝准地台的元古界相差无几, 其波速也相差很小, 故应是古生界底部基底。I 测线西部(洮河以西)一般埋深在1.5—2.4公里之间, 基底比较平坦, 沉积层波速为4.07km/s, 界面速度为5.80km/s。

I 测线北部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, 此处个别地段地表有基性岩出露, 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测线相同构造单元一样, 该地区古生代泥盆系即为基底, 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。

二、深部速度结构特点

1. 深部结构分层与速度分布

两条纵测线解释结果认为, 地壳内可分为沉积层、上、中、下地壳四层。

(a) I 测线上地壳埋深在15.5公里至19公里之间, 呈东深西浅趋势。上地壳界面基本平坦。在临潭县至洮河以西的龙元处有所上隆。从位于武山县的盘安开始向东, 界面呈起伏下降, 直到测线最东部埋深最深。来自本界面的反射波 P_2° 的平均速度有所变化。位于地台区的速度较低, 在5.79~5.83km/s之间, 由于地台区有较厚的沉积层, 且黄土层也较厚, 故剥去沉积之后的上地壳层速度并不太低, 平均为6.11~6.14km/s。在武山的鸳鸯镇到固关之间, P_2° 波的平均速度变高, 在5.91~5.98km/s之间, 层速度在6.11~6.14km/s之间, 与地台区相类似, 这是因为此处沉积层较薄之故。位于I测线西部的秦岭地槽区, 其 P_2° 波平均速度在5.87~5.92km/s之间, 上地壳层速度则在6.08~6.13km/s之间。总之, 层速度上地壳内横向变化不太大。I 测线 P_2° 波的平均速度为5.88km/s, 层平均速度为6.11 km/s。

由 P_4° 波求得中地壳下界面。I 测线上中地壳界面变化颇大, 其埋深最浅处为24公里, 最深处为32公里。在测线上临潭向东至漳县的当中岭有一较大的下陷, 张家川到陇县东侧有一个隆起。I 测线 P_4° 波平均速度在6.03~6.14km/s之间, 全线平均为6.08km/s。位于地台区内的陇县至灵台县该波平均速度略低, 其余各处并无明显变化。但中地壳层速度从西向东呈变大趋势。从阿木去乎到大草滩一带为6.26~6.29km/s, 从大草滩向东则为6.3~6.35km/s。全线平均为6.33km/s。

P_m 波反映的莫霍面在I测线总的趋势是从东向西逐渐变深, 测线最东端的灵台M面埋深为43.5公里, 最西的阿木去乎则深至51公里。地台区M面变化不大, 基本上为平界面, 在固关处M面有一变化, 从其东侧的近45公里, 变到西侧的49公里, 这是六盘山—陇山断裂所致。在位于武山县的盘安到甘谷县的新兴之间, M面从50公里左右上隆, 到新兴处已达44.5公里, 分析其东西为西秦岭北缘断裂所划分的秦岭地槽与祁连地槽。祁连地槽内高低起伏变化颇大。在大草滩下面有一M面变化剧烈处。下地壳的速度变化很大, 基本趋势是从西向东逐

渐变， P_m 波平均速度在阿木去乎到大草滩一带，在 $6.24\sim 6.28\text{km/s}$ 之间，从大草滩到甘谷一带，平均波速在 $6.28\sim 6.31\text{km/s}$ 之间，从甘谷到秦安~陇城一带，平均波速偏低，为 6.25km/s ，过了此段，一直到灵台，波速较大，平均波速为 $6.31\sim 6.36\text{km/s}$ 。全线地壳平均速度为 6.3km/s ，下地壳层速度亦有同步变化趋势。从阿木去乎到武山，大体上是位于秦岭地槽内，下地壳层速一般在 $6.5\sim 6.55\text{km/s}$ 之间。武山到陇县，位于祁连地槽，下地壳波速在 $6.61\sim 6.72\text{km/s}$ 之间，而位于地台区的下地壳层速则高达 $6.72\sim 6.87\text{km/s}$ 。整个下地壳平均层速度为 6.68km/s 。

(b) I测线上地壳埋深变化不大，在 $12.4\sim 15.6$ 公里之间，南端从成县到黄渚一带埋深较浅，为 12.4 公里。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。由此向北界面基本平坦，层厚亦较一致。 P_2° 波反映的平均速度与层速度亦有变化，从成县到天水南 P_2° 波平均为 $5.79\sim 5.83\text{km/s}$ ，上地壳层速度为 $5.94\sim 6.01\text{km/s}$ 。天水以北到西吉， P_2° 波平均速度一般在 $5.84\sim 5.92\text{km/s}$ ，层速度为 $6.01\sim 6.08\text{km/s}$ ，其中天水至秦安以北安伏一带 P_2° 波平均速度最高，为 $5.89\sim 5.92\text{km/s}$ 。I测线 P_2° 波全线平均速度为 5.84km/s 。

由 P_4° 波构成的中地壳埋深在I测线在 26.2 公里至 28 公里之间变动，其中在平南与天水之间略深一些，中地壳层厚为 $12.2\sim 14$ 公里。以天水南皂郊为界，其南部 P_4° 波平均速度较小，约为 $5.96\sim 5.99\text{km/s}$ ，中地壳层内平均速度为 $6.12\sim 6.21\text{km/s}$ ，皂郊以北则 P_4° 波平均速度较大，约为 $6.01\sim 6.10\text{km/s}$ ，中地壳层速度也较大，为 $6.21\sim 6.3\text{km/s}$ 。其中尤以天水至秦安北安伏一带为高。I测线全线 P_4° 波平均波速为 6.02km/s 。

I测线由 P_m 波构成的莫霍面埋深一般在 $43\sim 49$ 公里，总趋势是南浅北深。从成县到平南M面变化不大。在 $44.5\sim 45$ 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 $6.24\sim 6.28\text{km/s}$ ，相应下地壳层速度也较低。此段为 $6.59\sim 6.77\text{km/s}$ ，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 $6.35\sim 6.38\text{km/s}$ ，相应层速度为 $6.6\sim 6.9\text{km/s}$ 。此段M面上隆。北部 P_m 平均速度为 $6.28\sim 6.32\text{km/s}$ ，下地壳层速度为 $6.6\sim 6.66\text{km/s}$ 。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。

(c) I、II测线在秦安北安伏一带相交，两条测线独立求得此处的地壳形态与速度基本一致。

(d) 两条测线中、下地壳均为较大的梯度层。由 P_m' 波反演出下地壳梯度约为 0.03 。

2. 本区存在上地幔低速槽

I测线灵台炮、陇县炮、张家川炮与马场沟炮均可获得较长距离的 P_n 资料，我们以各炮 P_n 视速度为基础，采取各种模型追逐试错办法。由此可以得出下面的结果：在阿木去乎—中寨—张家川—灵台间 P_n 波平均速度分别为 8.03km/s ， 7.78km/s ， 7.97km/s ， 8.11km/s ，可见，在 105° 以西范围内，约有宽 100km 的上地幔低速槽。

3. 本区部分地段存在中地壳低速层

在I测线张家川炮及II测线平南炮的记录中均可发现 P_3° 波，经反演，认为该波反映了

中地壳顶部的低速层。I测线在武山县的盘安与张家川县之间发现,长约100公里。该层下界面埋深约20~22公里。层厚约3.5~5公里,低速层内速度约5.82km/s。II测线在天水至秦安一带存在低速层,下界面埋深为19~20公里。层厚约5公里,层内速度为5.85km/s。成县炮、秦安炮和西吉炮这个波组追踪不连续,故II测线其它地段未构制低速层界面。但是,从P4°波速度较低,中地壳层速度比I测线其它段来看,很可能II测线全线存在低速层。

4. 断裂特征

(1) 超壳断裂

(a) 鄂尔多斯西缘—六盘山断裂

北起贺兰山中段,经牛首山、大小罗山后往南经固原的断裂为鄂尔多斯西缘断裂,过了固原,便与海原—六盘山断裂重接,此断裂是中朝准地台与地槽的边界断裂。在I测线上115°点东侧Pg波资料有清楚显示,在固关与陇县间地层显示为奥陶系,寒武系之下便是元古界的震旦系了。两侧约有2—5公里宽的前寒武地层。但此之下,无古老地层显示,故可认为该断裂为东部抬升西部下降的正断层,倾向南西,倾角60°~80°,基底断距超过2公里。该带至少在加里东期便已形成,具多期活动特点,控制了古生代酸性基性岩的侵入和分布及新生代盆地沉积。由于93°炮与123°炮距此断裂都较近,故中间层断裂显示不清。但莫霍面则有明显的差异,除了东部抬升,西部下降(落差达3—4公里)外,两侧下地壳速度也有较大差异。地台区下地壳平均速度约为6.83km/s,而断裂以西则为6.65km/s,作为地震活动分界线,西部活动强烈,东部明显减弱,故可认为此带是南北地震带北段东部边界线。

(b) 西秦岭北缘断裂

作为祁连褶皱系与秦岭褶皱系分界的西秦岭北缘断裂,在62°测点附近相交,东侧在近似水平的第四系、第三系沉积之后,便是前寒武地层,而西侧新生代后是古生代的石炭—泥盆地层。其倾向偏东,呈逆断层性质,Pg波显示该断裂带由两条断距为1公里左右的断裂组成。II测线上188号附近,Pg波走时出现0.6秒跳跃,估计断距可达3公里。其北侧在新生界之后为前寒武地层,南侧为泥盆—石炭地层,倾向偏西,亦显示为逆断层。应当指出,北缘断裂在地表上显示为若干条平行断裂,地表显示较为破碎。此断裂控制了海西晚期的超基性、基性岩及加里东—燕山各期中酸性岩浆岩的侵入及喜山期的中酸性喷出岩和侵入体。

II测线由P2°波构制上地壳界面、P4°波构制的下地壳界面对此断裂均有反应。P2°的中地壳界面南侧埋深约为15.6公里,北侧埋深为14公里。下地壳界面南侧27.5公里,北侧为26.5公里。莫霍面在北缘断裂北侧有一隆起,埋深为43—43.5公里,而南侧则可深达45.5公里,可见北缘断裂为一超壳断裂。从速度来看,II测线北缘断裂北侧隆起处下地壳层速度可达6.9km/s。而其南侧则为6.77km/s。

I测线北缘断裂深部同样有显示,在对应地面64°至69°桩号下面莫霍面呈现东薄西厚的形态,落差约3公里,倾向偏东,为逆断层,抬起部位下地壳平均波速约6.61km/s,下陷部位则为6.54km/s。

非纵测线181°(平南炮)在IV测线上对中间层和莫霍面均有明显显示。在甘谷以北,中间层与莫霍面抬升,南部下降,M面在此落差达2公里,形态与I、II测线判定的结果相同。

(c) 临潭—凤县断裂带

该断裂带西起合作, 往东南经临潭、宕昌到雷家坝后转成北东东走向沿徽成盆地北缘至凤县呈一向南突出的弧形构造。上古生界冲覆于三迭系之上, 是礼县—柞水华力西冒地槽褶皱带与南秦岭印支冒地槽褶皱带的边界断裂。Pg波显示基底界面落差1公里左右。在大草滩处M面呈西部向下俯冲, 地壳平均速度为6.28—6.31km/s, 而东部为6.24—6.28km/s, 判定M面已错断。该带西段尚有混杂堆积, 经历了自加里东期以来历次强烈构造运动, 控制了海西—燕山各期中酸性岩侵入及中生代地层的分布。海西期超基性岩及喜山期碱性超基岩沿该带侵入或喷溢。

(d) 南北向断裂

在武都炮宕昌东25公里处, 发现有一M面上的深部断裂, 该断裂呈西盘下降, 东盘抬升, 且西盘下倾插入东盘。断点附近西侧埋深从45.5公里下降为48公里, 东侧从47公里抬升至45公里, 错断深度达3公里。在甘沟炮相应于通渭县华家岭一带, 亦发现类似形态, 西盘下降达53.5公里, 东盘抬升达49公里。在灵台—临潭纵测线上, 相应于武山附近, 也有一相同形态断裂。故存在宕昌—武山—通渭北北东向断裂, 该断裂走向南北方向偏东约15°, 近似南北向深部断裂。这一断裂在地表并无明显显示, 因此该断裂是隐伏的深部断裂。

在武都炮反射面上, 大约在西和县东北15公里宽川一带, 发现有一西浅东深的M面错断, 西盘深45.5公里, 东盘47.5公里。甘沟炮威戎附近, 亦有类似形态, 西盘错断处约18.5公里, 东盘为50.5公里, 再向东, 又缓慢上升。与此相应, 大约秦安附近, 亦出现一个类似的约2公里的M面错断。在威戎处, 成县—西吉测线亦有反演结果, 其大体形态是南浅北深, 与非纵测线解释一致, 且深度基本相符。由此, 可以判定在西和一秦安—静宁也存在一个北北东向深部断裂, 该断裂大约为北偏东18°, 它仍然是一个隐伏深部断裂。

此外, 在甘沟炮反射面上, 在通渭东亦可以发现M面的错断。

综上所述, 在宕昌—通渭—静宁—礼县范围内, 存在一系列北北东向平行深大隐伏断裂。这些隐伏断裂, 是控制本区7级以上大地震成南北排列的主要因素。对天水地区航磁资料的解释认为, 存在一个南北向深部构造带, 即武都—通渭断裂, 但是, 这个断裂在地表地质上并未找到证据。本次人工地震测深的结果认为, 本区深部存在一组北北东方向的超壳断裂。

(2) 基底断裂

除上面所述超壳断裂之外, 本区还发现了大量基底断裂, 有些甚至可能断到中地壳。

(a) 会宁—张家川断裂

此断裂为北祁连优地槽褶皱带与祁连中间隆起带的分界断裂, 在I测线的96°点附近, 基底界面埋深显示该断裂的断距为1公里左右。在I测线上230号附近通过该断裂, 断距可达1.5公里, 此断裂倾向南西, 倾角54—68°。控制了两侧下古生代的沉积建造及海西期的中酸性岩浆侵入。在I测线上此断裂西侧, 在I测线此断裂南侧约15公里左右, 发现与之平行的断裂。

(b) 清水—马衔山断裂

该断裂是控制沉积建造和火成活动的重要断裂。该断裂在测区内多被第四系地层所覆盖, 地表断裂显示不清。该断裂在72桩号附近通过, Pg波到时有清晰显示, 走时跳跃0.5秒, 该断裂在基底界面上的落差达2.5公里, 它是本区较大的断裂之一。该断裂在I测线

205桩号附近通过,但断距只有0.5公里左右。就是说该断裂其规模北段远比南段要大。从210号炮Ⅶ测线的结果看,此断裂可能断到中地壳,为逆断层。

除了上述构造边界断裂外,本区还可发现龙门镇断裂,西屯断裂,刘家川与盘古川断裂,大草滩南侧断裂,麻沿河断裂,莲花城南断裂,天水北侧断裂带与将台堡与兴隆间断裂等。

5. 本区大地构造单元的特点

按照黄汲清指导编绘的中国大地构造图,本区可划分为两个一级构造单元和七个二级单元。表4—1为本区大地构造单元简表,其平面分布见图4—1。

这些构造单元具有下述特点:

(1) 基底特征差异

中朝准地台形成于早元古代末的中条旋回固结期,其基底当属前元古界,祁连褶皱区于晚古生代末扬子旋回固结,其基底应为前寒武或震旦系,但是本区秦岭褶皱系中古生代的泥盆系普遍中深变质,其岩性已与中朝准地台之前元古界相差无几,物理性质亦不可能差别太大,由Pg波获得的基底应是古生界底部的基底,位于南秦岭地槽的Pg波获得的是古生界顶部基底。东部中朝准地台,盖层自晚元古生代到古生代,除缺失上奥陶—下石炭统外,为一套典型的地台型海相—海陆交互碳酸盐岩—含煤碎屑岩建造。西部祁连褶皱系与秦岭褶皱系,在晚元古代末扬子旋回固结后,又于加里东、海西及印支期分别自北向南、自东向西裂陷而成地堑,并分别沉积了一套优地槽型海相火山岩建造,碎屑岩—碳酸盐岩建造和冒地槽型滨海—海相复理石,类复理碎屑岩—碳酸盐岩建造。北祁连优地槽褶皱带和祁连中间隆起带自中生代初期始,南祁连褶皱系以南自中生代中期起,先后结束海浸,转为陆相的孤立山间小盆地,沉积了河湖—泥炭沼泽相碎屑岩或含煤碎屑岩建造,依次成高角度不整合覆于不同老地层之上。

中朝准地台区基本为水平沉积。沉积层波速为4.16km/s,毗邻的祁连地槽褶皱很剧烈,浅层断裂发育,中间有不少深部火成岩上涌到地表,沉积层波速为4.22~4.3km/s,秦岭地槽显示为古生代地层,沉积层波速为4.08~4.3km/s。

(2) 深部速度结构的差异

表9—1列出了本区鄂尔多斯地台、祁连地槽与秦岭地槽在深部速度结构上的差异。由表可见,地台区上、中地壳波速较之地槽区低,但下地壳波速明显高于地槽区,地壳厚度为地台区小于地槽区。

祁连地槽与秦岭地槽相比,亦有较为明显的差异。总体来说,上、中、下地壳的波速均是前者高于后者。

综上所述,六盘山—陇山断裂是中朝准地台与祁连地槽的分界线,也是南北地震带北段东部边界。西秦岭北缘断裂是祁连地槽与秦岭地槽的分界。

表 9—1 本区地质构造单元之间的速度分布 (km/s)

		测 线	鄂尔多斯地台	地 槽	
				祁连地槽	秦岭地槽
沉 积 层	沉 积 层	I	4.16	4.22—4.31	4.07—4.10
	速 度	I		4.13	4.15
	基 底	I	5.80	5.90—6.01	5.80
	速 度	I		5.93	6.00—6.08
上 地 壳	平 均	I	5.79—5.83	5.91—5.97	5.87—5.99
	速 度	I		5.84—5.92	5.79—5.83
	层	I	6.11—6.14	6.11—6.14	6.08—6.13
	速 度	I		6.01—6.08	5.94—6.01
中 地 壳	平 均	I	6.03—6.08	6.06—6.11	6.05—6.14
	速 度	I		6.01—6.10	5.96—5.99
	层	I	6.33—6.35	6.30—6.35	6.26—6.29
	速 度	I		6.21—6.30	6.12—6.21
下 地 壳	平 均	I	6.31—6.36	6.28—6.31	6.24—6.28
	速 度	I		6.28—6.38	6.24—6.28
	层	I	6.70—6.87	6.61—6.72	6.50—6.55
	速 度	I		6.60—6.90	6.59—6.77

参 考 文 献

- [1]梁中华等, 天水地震区地壳浅层速度结构, 本文集。
 [2]张生源等, 天水地震区浅层地质构造, 本文集。
 [3]闵祥仪等, 灵台—阿木去乎剖面地壳速度结构, 本文集。
 [4]李清河等, 成县—西吉剖面地壳速度结构, 本文集。
 [5]周民都等, 天水地震区非纵资料解释, 本文集。

THE FEATURES OF CRUSTAL STRUCTURE IN TIANSHUI
EARTHQUAKE AREA

Li Qinghe, Ming Xiangyi

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB)

Abstract

Based on the interpretation of DSS in Tianshui earthquakes area, the features of basement, deep velocity structure, fault and tectonics are analysed and summed up. More profound, systematic and comprehensive understanding about this area from shallow to deep, from geophysics to geology, from crustal structure to tectonic and its formation are obtained.