

河西走廊地区地壳底部低阻层 及其与地质构造和地震活动性的关系

张必敖 赵文星 朱佐全

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文在阐明河西走廊地区地壳底部阻层空间分布特征的基础上,对该低阻层与地质构造、其他地球物理场和地震活动的关系进行了探讨。

引 言

近年来,兰州地震研究所大地电磁测深组在甘肃河西走廊及其邻近地区完成了 20 个大地电磁测深点。资料采集过程和张量阻抗处理结果表明,这些相对点距较密的测点资料质量较好。对畸变较小的主轴方向上的张量阻抗视电阻率曲线进行大地电磁反演,所得的地壳和上地幔的电性结构具有分区一致的特点,并呈现出某些趋势性的变化。反演结果表明,测区内的 20 个测点中,有 11 个测点显示出了地壳底部存在着一个低电阻率层位。地壳和上地幔中存在低阻层,是大地电磁测深法在地球深部探测中最有成效的成果之一。这些低阻层与地质构造运动、其他地球物理场和地震活动有着密切的联系。

一、河西走廊地区地壳底部低阻层的空间展布特征

图 1 给出了兰州地震研究所大地电磁测深组在河西走廊及其邻区完成的 20 个大地电磁测深点(计 21 个点次)的展布范围。可以看出,该测点包括了东至民勤、古浪,西至敦煌、阿克塞,北至马宗山,南至柴达木盆地,以河西走廊为主的广大地区。

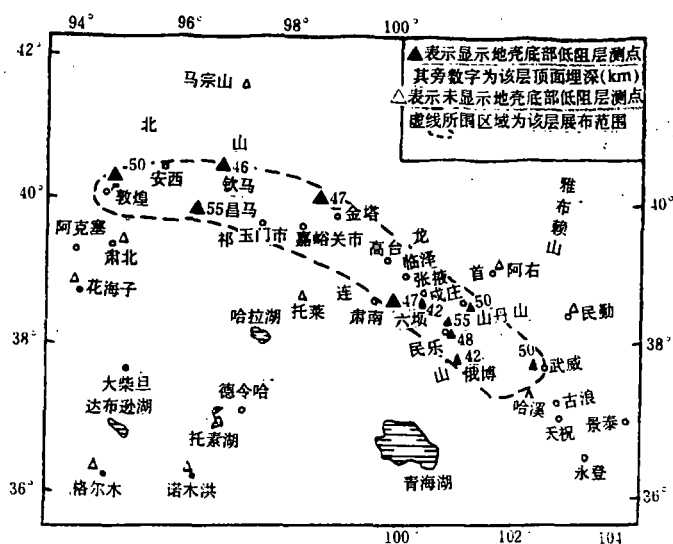


图 1 河西走廊地区测点分布及地壳底部低阻层平面分布图

表 1 河西地区测点地壳底部的低阻层

测点名称	敦煌	昌马	饮马	金塔	张掖	梁家墩	民乐六坝	民乐戎庄	民乐县城	山丹	邮电农场	武威	长城公社	俄博
顶面埋深 (公里)	50.3	55.1	46.2	47.4	47.1	45.5	55.2	49.0	49.5	46.1	41.5			
底面埋深 (公里)	51.6	(57.9)	46.6	49.7	(49.9)	58.9	80.5	51.4	51.5	50.4	42.2			
莫霍面深底 (公里)	50	56	49.5	49.5	52	53	55	56	52	52	58			
注: 由表求得低阻层底面平均埋深和标准偏差为 $H=51.1 \pm 3.2$ 公里 由重力资料求得的莫霍面平均埋深和标准偏差为 $H=53 \pm 2.9$ 公里														

测区内的 20 个测点中,有十一个测点显示了地壳底部存在着一低电阻率层位^[1]。表 1 列出了这些点上该低阻层的顶面埋深、底面埋深以及平均底面埋深和标准偏差,以及由重力资料得到的莫霍面深度。该低阻层的空间展布具有以下特征:(1)平面上沿走廊拗陷带分布,且在走廊拗陷带内所有测点都有显示,拗陷带之外的其余测点除位于北祁连山区和祁连山与走廊区交接处的昌马、俄博两测点外,该层缺失(位于柴达木盆地内的花海子、格尔木、诺木洪测点因电磁波穿透不深不能判定);(2)底面平均深 $\bar{H}=51.1 \pm 3.2$ 公里,与按重力资料得到的在上述测点处莫霍面深度的平均值 $\bar{H}=53 \pm 2.9$ 公里相近,与得用天然地震在莫霍面上的反射波及首波所确定的甘宁青地区的平均地壳厚度 $\bar{H}=52 \pm 2.5$ 公里也非常接近^[2],由此可见,该低阻层位于地壳底部;(3)平均厚度为 $\bar{h}=2.8 \pm 1.6$ 公里。其中昌马、张掖、梁家墩测点因电磁波穿透深度较浅,未能得到该层厚度,表中所列低阻层顶面埋深是以其余九个测点的平均厚度类推得到的;(4)电阻率值为数欧姆·米,而其上下邻层的电阻率达几百甚至几千欧姆·米,对比度很大。一般来讲在地下 40~50 公里深处的温压条件下,岩石电阻率通常较高,可见该层为一异常低阻层。

二、河西走廊地区地壳底部低阻层与地质构造的关系

河西走廊地区存在地壳底部低阻层这样一个特殊的电性结构层位,与本区特殊的地质构造及其运动背景相联系。总观本区地质构造及其活动历史,可以看出这一特殊电性层的存在与地质构造及其运动的关系有以下特点:

本区地壳底部低阻层展布的区域正处于现今强烈活动的青藏高原与相对稳定的阿拉善地块之间的河西走廊拗陷带或称走廊过渡带上。

低阻层展布的边缘多为深大断裂。本区南有祁连山北缘大断裂,北有龙首山南缘断裂,西有阿尔金大断裂。这些断裂均为超壳或岩石圈断裂,部分地段上切穿了地壳底部的低阻层。

本区新构造运动强烈,主要表现为走廊带与其邻区的垂直差异运动。燕山运动使北北西向断裂与祁连山北缘断裂带重新活动,走廊带在下古生界褶皱基底上形成一系列长轴北西向的菱形断陷、拗陷盆地(酒西、酒东、张掖民乐、武威盆地等)。新构造运动表现为祁连山强烈上升,龙首山区缓慢上升,走廊拗陷带强烈下降,其中酒泉盆地第三系地层厚达 2000 米,第四系达

1000 米,武威盆地第三纪沉积 1500 米,张掖民乐盆地第四纪沉积 750 米。地形变测量研究表明,河西走廊以西向东沿酒泉——张掖——武威一线现今仍在下沉(见图 2)。

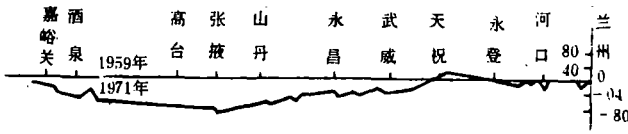


图 2 嘉峪关——兰州水准复测形变图

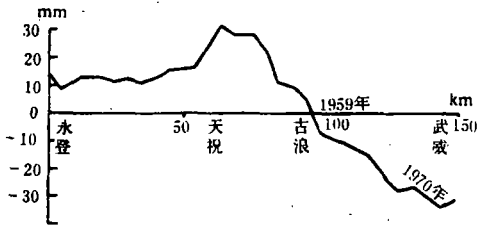


图 3 永登——天祝——武威垂直形变剖面

由图 2 可求得下降速率

由酒泉的每年约 6 毫米到武威每年 4 毫米,张掖处最大达 10 毫米左右。而东部的古浪、天祝、永登一线却在缓慢上升(见图 3)值得注意的是,壳下低阻层正处于整体

下沉的地区,该层东端消失在下沉和上升的转折处古浪附近,其南、北两侧的祁连山,龙首山也在不断隆升中。

三、河西走廊地区地壳底部低阻层与地球物理场的关系

河西地区主要的地球物理实测资料是重力资料,此外,可以用温泉分布资料间接推论地热情况。还可以用大地热流与壳内低阻层和上地幔第一低阻层的关系的经验公式计算该地区大地热流值。在此仅就以上两点做些讨论。

1. 该低阻层展布范围与重力梯级带和负均衡异常一致。从甘肃西部地区重力异常和均衡异常图上可见,低阻层展布区即走廊拗陷带正处于重力梯级带上,布伽异常等值线的走向为北西西向,与走廊长轴方向一致。均衡异常的等值线也呈北西西向线性分布。在该区域内,均衡异常一般在 +20 和 -20 毫伽之间,仅在走廊地区和南部哈拉湖区出现两个较大的负异常区,达 -40 毫伽。文献[3]认为,哈拉湖区可能属于正常的均衡调整区而北部走廊由于第四纪以来总体处于下沉,因而属于均衡调整反向地区,表明该区除受均衡调整力外,还受其他力源作用。

2. 局部地温较邻区偏低。河西走廊地区没有温泉出现,而相邻的北祁连山区及走廊以东地区有温泉出现,北面的龙首山区和阿拉善地块内也有温泉出现。甘肃东部兰州、天水地区温泉分布较为密集,如果温泉分布能够基本上反映地表热流及地温状况,则可认为河西地区地面热流比邻区偏低。

Adam 在研究东欧地区大地热流与壳内低阻层和上地幔第一低阻层的关系时得出如下经验关系式

$$h = h_0 q^{-a}$$

式中, h 为低阻层的顶面埋藏深度, q 为平均大地热流值(单位为微卡/厘米² 秒,即 HFU) h_0 和 a 的选取对地壳内的低阻层和上地幔第一低阻层分别为 $h_0 = 35$ 公里, $a = 1.30$ 和 $h_0 = 155$ 公里, $a = 1.46$ 应用该式用地壳中部、底部、上地幔第一低阻层估算得到的河西走廊及其邻区十七个测点(除柴达木盆地的三个测点外)上的地面热流值(对同时存在二、三个层位的取其平均值)如表 2 所示,由表 2 计算得河西走廊九个测点热流平均值为 1.08HFU,其余祁连山、北山

和阿拉善地区的八个测点热流平均值为 1.34HFU, 计算结果表明河西走廊热流平均值低于其邻近地区。需要指出: 以数字的估算有很大程度的不准确性, 而且根据不同层位低阻层的估算结果差别较大, 这可能与不同的地区经验公式的适用范围有关, 尽管如此, 以上数据与温泉分布资料对比, 似乎仍可说明河西走廊地面热流较其邻区偏低。

表 2 河西走廊及其邻近区测点上的在面热流估算值

测点	敦煌	饮马	金塔	张掖	民乐六坎	民乐戎庄	民乐县城	山丹	武威	马宗山	阿右	民勤	肃北	昌马	托莱	俄博	哈溪
热流值 HFU	0.76	1.10	1.08	1.31	1.30	1.24	0.77	0.99	1.20	1.28	1.36	1.37	1.44	1.66	1.38	1.10	1.11

四、低阻层与地震活动性的关系

随着应用地球物理学和地震预报理论的实践的发展, 地壳——上地幔内的低阻层与地震活动性的关系越来越引起人们的关注。人们发现, 在上地幔低阻层隆起或是埋深急剧变化的地区, 地震活动性较强, 如南北地震带北段, 华北京津唐地区等。而地壳中部的低阻层则往往与地震震源深度有一定的对应关系, 很多情形它成为中强震震源的底。那么地壳下部到底部的低阻层与地震活动性有什么关系呢? 本文根据河西地区的地震资料对此作一探讨。

1. 河西地区地壳底部低阻层为本区震源深度的下界。河西地区地震的震源深度分布在地壳内, 目前还未发现莫霍面下有震源。其中绝大多数地震分布在 10~30 公里的深度。在九条岭地区, 地震分布在 5~40 公里的深度。这说明河西地区地壳底部的低阻层是震源深度的下界。这表明了该低阻层确为一力学软弱层, 介质具有较高的塑性特性, 不能集中应力。当地壳水平挤压力作用下作侧向滑动时, 由于这一“塑性层”不消耗应变能, 把应力转移到它的上部, 使其上的应力水平强高, 发生地震的几率增大。

2. 大震发生在地壳底部低阻层展布的边缘带。1932 年昌马 7.6 级大震发生在北祁连山区与河西走廊紧邻, 处于该低阻层的西南端部。1954 年山丹 $7\frac{1}{4}$ 级大震则位于该低阻层的东部北缘。1927 年古浪发生过八级大震, 哈溪测点位于这次地震的极震区边缘。该测点处未显示有地壳底部低阻层, 但其邻近的武威测点有该层的显示, 所以仍可以认为哈溪测点位于该低阻层的边缘地带。这些地震如古浪地震的震后地形变以垂直升降为主, 即断层滑动主要为倾滑。这可能是由于在这些低阻层展布的边缘地带垂直差异运动比较显著, 地壳底部的低阻层在孕育过程中起了某些作用。可以想象, 当地幔下陷引起地壳底部的部分熔融和走廊地壳后来的下陷, 但下陷在各处是不一致的。由于在周围断层面下陷在各处是不一致的, 于是在周围断层面的闭锁段上出现了垂直方向的初始剪切应力。其后地壳底部的部分熔融层使该处的断层沿倾向蠕滑或蠕变, 随着断层蠕变从地壳深处向上传播, 在闭锁段上逐渐形成高度的应力集中, 当剪切应力超过断层面上的抗剪强度时, 大震就发生, 并能在震后形成较大的垂直形变分量。昌马地震形变带的垂直升降量最大达 3 米, 水平扭动量一般不超过 5.5 米; 古浪地震的形变带主要由地震陡坎, 地裂缝和隆梁组成, 垂直错距达 2~7.5 米; 并且这两次地震形变都显示了在存在地壳底部低阻层的一侧下降, 另一侧上升的特点, 而大地水准测量结果表明古浪附近至今还

在东升西降。由此可见在这些地震的发震机制中就有早期地幔下陷引起的垂直差异运动的影响,这样断层就能在地壳底部部分熔融层附近产生蠕变并向上传播,导致在地壳的“贮能部位”应力集中,这与张国民等(1980)提出的发震断层的“蠕动~应力集中”模式一致。

3. 小震垂向分布的成层性特征与地壳电性结构的关系。利用文献给出的河西走廊几个地区的电性结构和小震分布剖面图(图4,其中张掖民乐盆地有四个测点,电性剖面相似,取其相应分层的平均值),我们来对比研究河西走廊地下电性结构和小震活动的垂向分布特征。由图4a可见,昌马地区在10~21公里深度上存在一巨厚的壳内高导层,有震源深度的几次小震集中于18到20多公里的深度范围内(一次例外是16公里),明显地集中于中~上部地壳低阻层的界面附近,在该层与底部低阻层之间无小震发生。图4b说明张掖民乐盆地的小震活动位于近地表、地壳中部、底部的低阻层附近。图4c表示山丹震区附近的地震分布情况。1954年山丹7 $\frac{1}{4}$ 级地震深度为12公里,位于地壳中部低阻层与地表的中间,小震活动也集中于地壳中部低阻层以上。图4d说明金塔地区小震活动很少,仅有的几例在地表与壳底的两个低阻层之间零散分布,这一明显少的小震分布可能与中部低阻层缺失有关。由此可见:(1)地壳中部低阻层与地震活动有密切关系。存在这一低阻层的地区,小震活动多,且集中在其界面附近;缺少这一低阻层的地区,则小震活动少,且分布没有明显的集中趋势。(2)地壳底部低阻层和中部低阻层的同时存在,往往使地壳下部的地震活动明显减少。

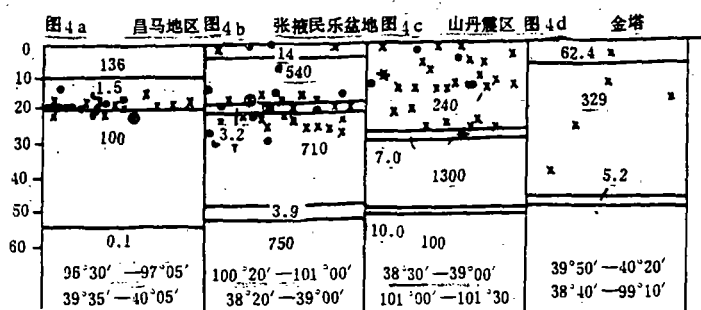


图4a 昌马地区图 4b 张掖、民乐盆地图 4c 山丹震区图 4d 金塔

对上述结论,可以从地壳构造应力分布和介质特性两个方面来解释。在水平向挤压力作用下,地壳内部的构造应力由地壳中部向上直到地表面附近逐渐减小到某一数值,由中部向下构造应力也应逐渐减小,就是说地壳中部具有较高的应力水平。而地壳中部的低阻层多为富含水的脆弱介质,且温度不太高,介质呈弹性,因而本来就具有较高水平的应力又容易在这部分脆弱介质界面附近形成应力集中而发生地震。缺失此层的地区,尽管应力水平很高却难产生应力集中。在存在地壳下部到底部低阻层的地区,如果该层是部分熔融的,则在此层内部及其边界上难以产生剪切应力,因而地壳中部以下的构造应力大大减小直到熔融层界面上接近于零,比没有这一层位的地区更低(这种情况下地壳构造应力垂向分布的大致图象如图5所示,图中虚线部分表示地壳底部没有低阻层的地区地壳应力分布的大概情况),而且由于下地壳温度较高,介质塑性较大,难以形成应力集中,这样就难以发生

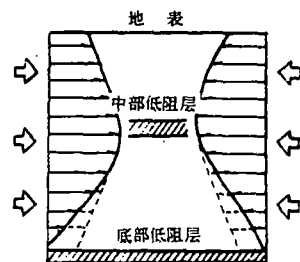


图5 地壳内构造应力垂向分布示意图

地震。

结束语

河西地区地壳底部低阻层的平面分布与地质构造、重力场、地面热流,其垂向分布与地震波速、地热场,其形成与构造运动等有着密切的联系。这种种现象的联系中可能包含有本质的联系,它们之间或受某种共同因素制约,或具有相同一种发生原因。如,可能是地幔相变的结果。从它们的同一发生原因或密切联系出发,可以进行有关动力学过程的研究。

地壳内部低阻层与地震活动性的关系主要表现为,中部低阻层附近容易形成高度的应力集中,因而与地震活动关系最为密切,而地壳底部低阻层有利于发震断层的下部蠕滑和上部的应力集中,在大震孕育过程也会起到一定的作用。地壳内部低阻层的存在使小震活动具有成层性的分布特点。

本文对河西走廊地区地壳底部低阻层与地质构造、其他地球物理和地震活动关系的探讨,仅是初步的,还有许多尚等进一步研究的地方。而且,这样一个位于壳——幔过渡带的低阻层,其存在可能具有更深远的地壳演化、地球动力学等方面的意义。随着进一步的野外探测工作,可能还会在更多的地区发现地壳底部低阻层的存在。再辅以理论和模拟实验的研究,我们将能获得更全面的认识。

参考文献

1. 兰州地震研究所大地电磁电深组,河西走廊及其附近地区的大地电磁测深,1983。(尚未发表)
2. 张诚等,甘肃及其邻近地区的地壳厚度,西北地震学报,V01. 5,NO. 1,1983
3. 梁桂培、陈爱玲等,甘肃西部地区深部构造,西北地震学报,V01. 5,NO. 1,1983
4. 张诚等,甘肃地震活动特征,西北地震学报,V01. 4,NO. 2,1982