

中国辽南地区地壳与上地幔介质的横向不均匀性与海城 7.3 级地震

卢造勋¹⁾ 刘国栋²⁾ 魏梦华²⁾ 孟朴在¹⁾ 赵俊猛¹⁾

1) 辽宁省地震局

2) 国家地震局地质研究所

摘要

近几年来，在辽南地区开展深部地球物理探测的基础上，通过对深地震测深、大地电磁测深、重力、航磁、大地热流等综合地球物理资料对辽南地区地壳与上地幔介质进行不同物性的正、反演计算与研究，获得了辽南地区地壳与上地幔介质的速度结构、电性结构、密度结构和温度结构，揭示了该区介质的横向不均匀性及其重要特征。发现在海城地震区一带，存在壳内低速、高导、低密度、高热流等一系列重大地球物理异常，在空间上与震源区存在相当好的一致关系，对分析大震的震源物理过程提供了重要实际依据。

关键词 地壳与上地幔；横向不均匀性；低速层；高导层；海城地震

一、引言

1975 年海城 7.3 级地震发生后，在辽南地区开展了以深地震测深为主的综合地球物理探测工作，获得了大量的深部地球物理资料。特别是闾阳—海城—东沟深地震测深剖面的详细探测及其资料经过层状均匀介质条件下的解释，初步揭示了辽南地区主要是海城震区的深部构造特征^[1]。为了进一步研究本区地壳与上地幔结构，特别是介质的横向不均匀性特征，深入探讨震区的地球物理环境，近年来，相继沿上述剖面进行了大地电磁测深，在海城震区一带，开展了大地热流测量^[2]，并将深地震测深、大地电磁测深、重力、航磁、大地热流等综合地球物理资料，在非均匀介质条件下进行了综合计算反演，获得了本区地壳与上地幔速度、电性、密度和温度结构的纵、横向不均匀性及其主要特征。结合地质与地震活动性，综合研究了海城地震区地壳与上地幔介质分布及其与地震活动的关系。本文重点介绍该区地壳与上地幔的二维速度结构、密度结构、电性结构和温度结构的纵、横向不均匀性及其主要特征，讨论它们在空间分布上的相互对应关系及其与海城 7.3 级地震的相关性。整个研究思路如图 1 所示：

1988 年 10 月 19 日收到本文初稿，1989 年 11 月 5 日决定采用。
本文由编委冯锐推荐。

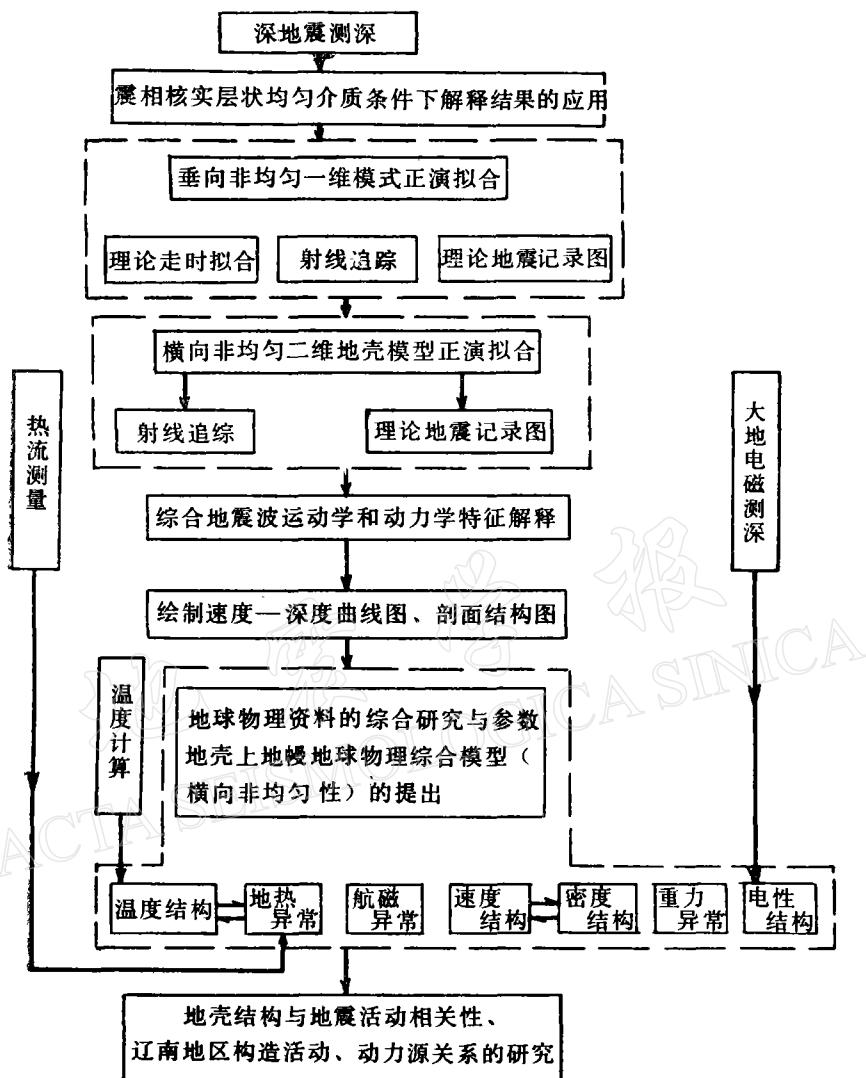


图 1 辽南地区地壳与上地幔介质的横向不均匀性研究技术思路框图

二、地壳与上地幔速度结构

闾阳—海城—东沟剖面深地震测深资料是本区地壳与上地幔速度结构研究的基础。该剖面深地震测深的探测由七个爆破点构成相遇和追逐系统，用连续剖面法与点式测深法重复对比观测方式完成(图 2)。所取得的地震波组及其性质见表 1。其特征在文献[1]中作了详细讨论。图 3 为其典型记录。

在可靠识别震相的基础上，应用沿剖面浅层地质钻井资料所获得的速度-深度数据，并以均匀层状介质条件下的解释结果作依据，选取地壳速度结构初始模型，进行二维非均匀介质条件下的速度研究，整个计算过程是用 Seis-83 程序包实现的。其原理见参考文

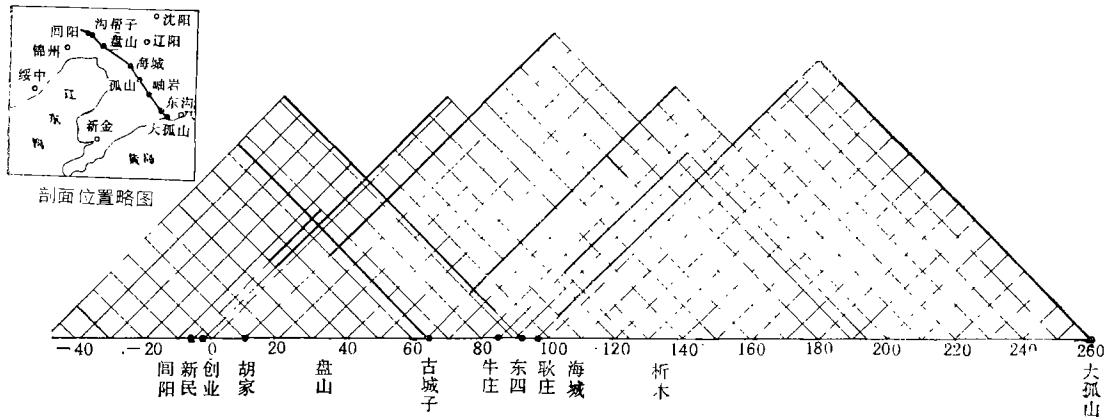


图2 闾阳—海城—东沟剖面位置及深地震测深观测系统图

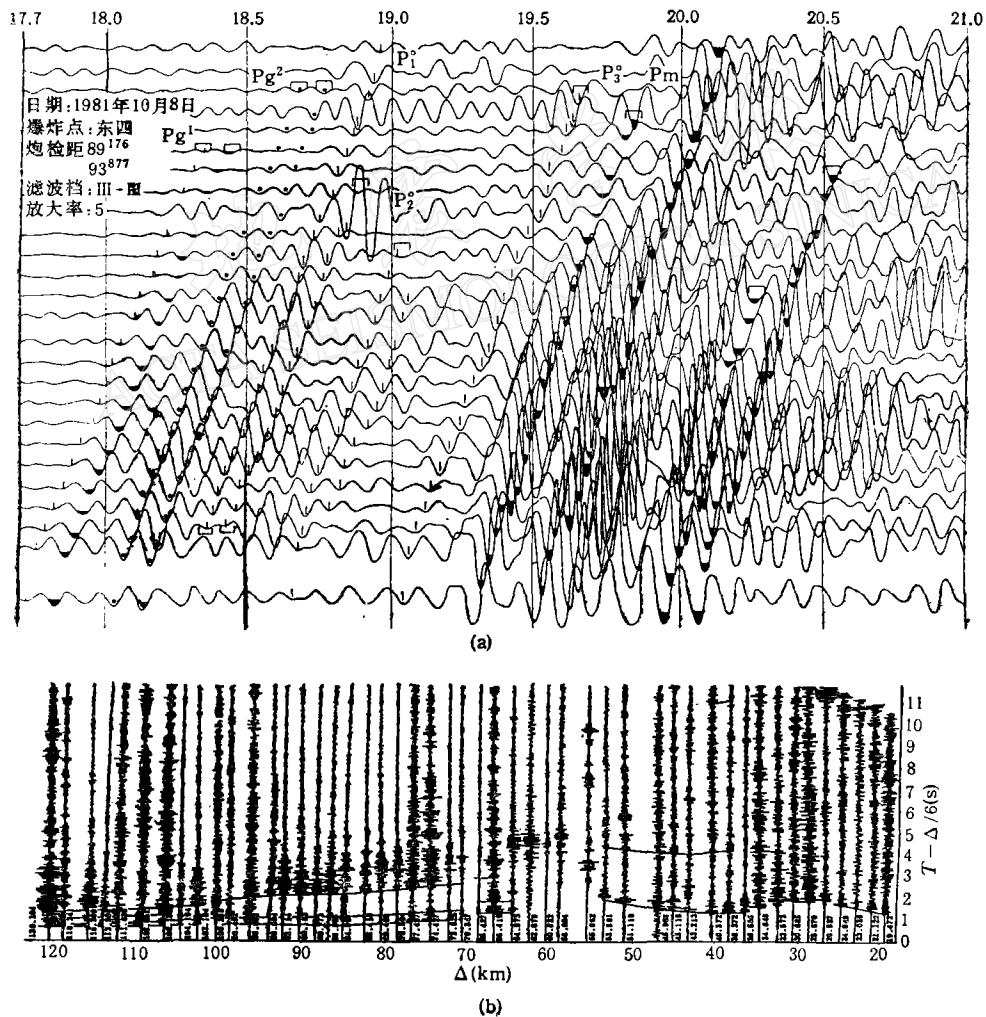


图3

(a) 闾阳—海城—东沟深地震测深剖面典型波组记录; (b) 东四炮点记录截面图

表 1 主要地震波组及其性质

波组名称	性 质	可能反映的地壳与上地幔界面
Pg	回折波(或首波)	基底界面(指当首波解释)
P ₁ ^o	反射波(宽角度)	上层地壳底界面
P ₂ ^o	反射波(宽角度)	中层地壳内界面
P ₃ ^o	反射波(宽角度)	中层地壳底界面
Pm	反射波(部分为回折波)	莫霍界面
Pn	首波	莫霍界面
P ₄ ^o	反射波(宽角度)	上地幔内部界面

献[3].在解释过程中,充分利用了各主要震相的运动学和动力学特征,用射线追踪法及理论地震记录图实现了解释结果与实测资料的统一(图 4, 5, 6),最终获得了整条剖面较近似的二维速度结构剖面。并采用等值线的形式描述了该剖面由浅到深的各层速度结构,清楚地反映了地壳与上地幔速度在纵向及横向上的变化规律(图 7)。从中可以看出本区

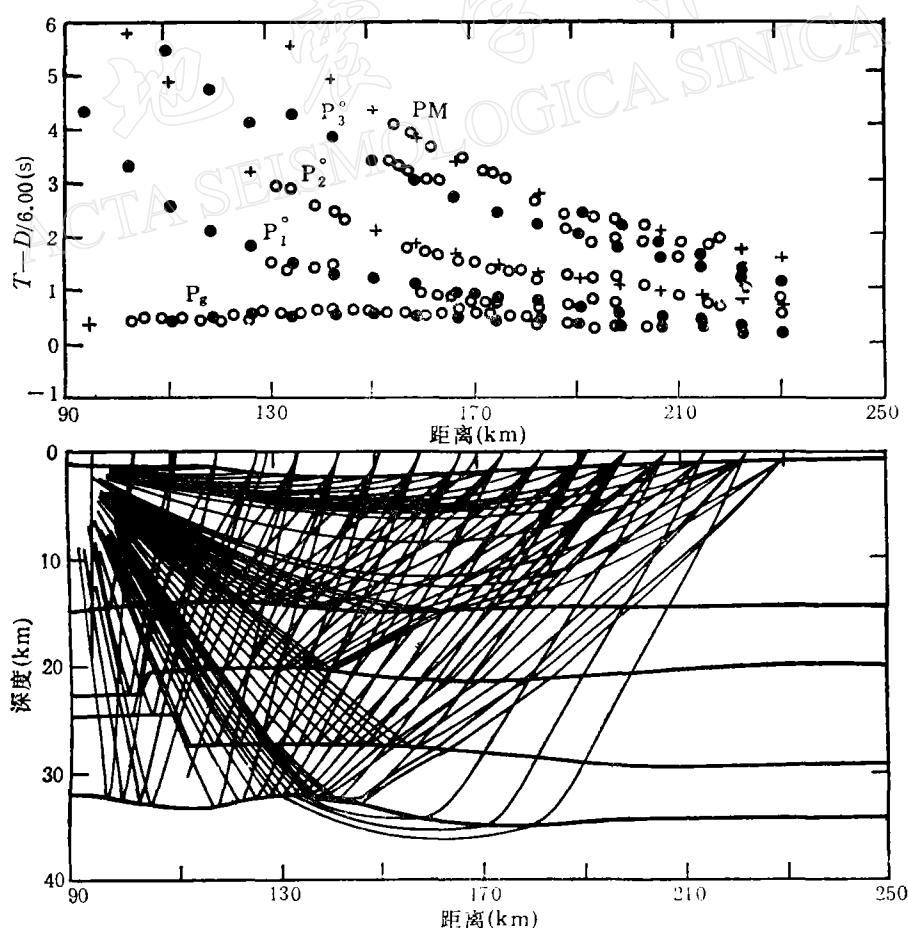


图 4 耿庄炮点二维射线追踪图 (“○”为实测走时,“●”或“+”为理论走时)

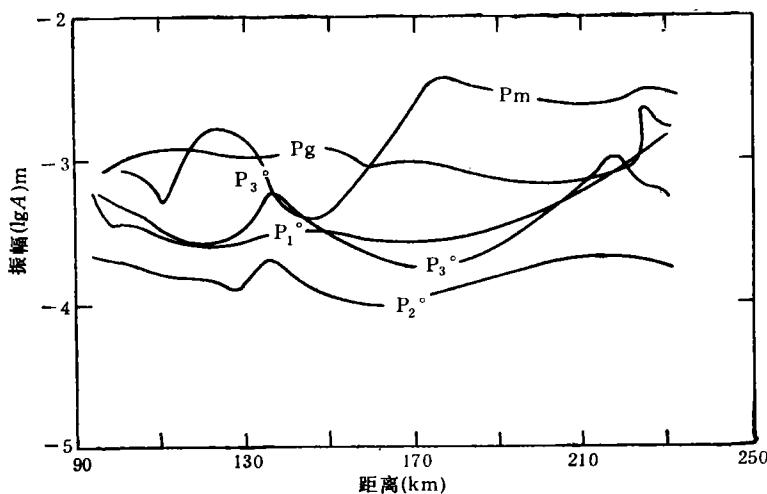


图 5 耿庄炮点二维理论振幅图

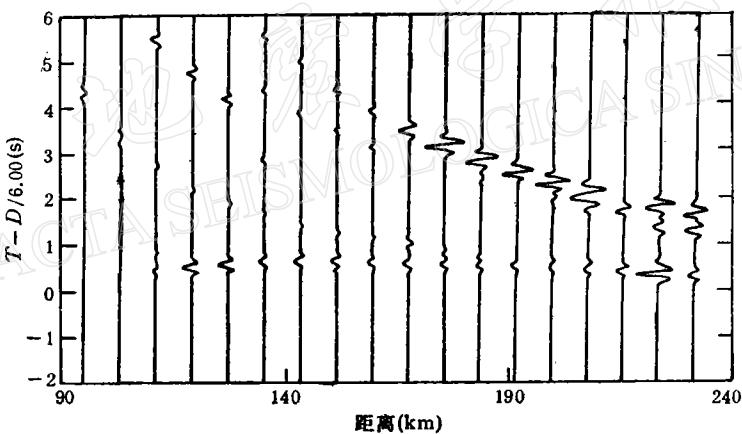


图 6 耿庄炮点二维理论地震记录图

地壳与上地幔顶部速度结构具有以下特征：

1. 速度结构反映了地壳分层及速度的横向不均匀性

上层地壳 上地壳厚度为 13—15km，其中包括沉积盖层。速度随深度增加，其变化范围为 2.0—6.3km/s，桩号 90 千米以西 0—4.0km 深度范围内，2.5km/s 速度等值线基本上反映了辽河平原中、新生代沉积厚度的变化趋势，第一个速度分界面大体反映了中、新生界地层的底界。桩号 90 千米以东，0—2.5km 深度范围内 4.8km/s 等值线基本上反映了辽东半岛古老基岩上部受风化较强层位的变化趋势。

中层地壳 中层地壳厚度约为 14—16km，其底界深度从 25km 增至 29km 左右。中地壳由两个速度层组成，其上部为一速度逆转层，但逆转程度不一。在辽河平原东侧至辽东半岛西侧的过渡地带内速度逆转极为明显，其它地段则非常微弱。其下部为一正速度梯度层。

下层地壳 下地壳厚度约为 5—8km，其底界深度从 32km 增至 35km，以桩号 30 千

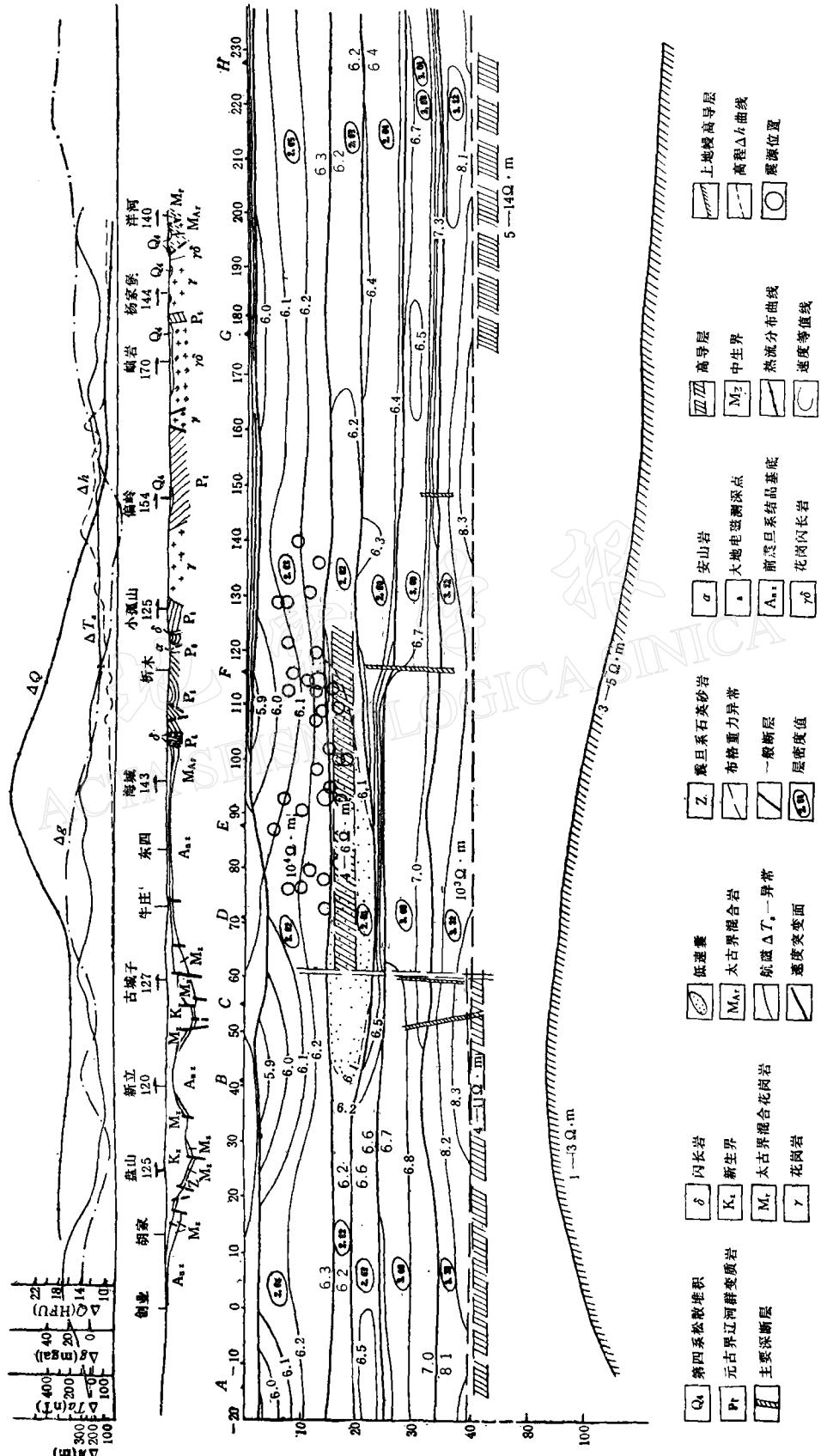


图 7 间阳—海城—东沟剖面地壳与上地幔地球物理综合解释图

米及90千米一带底界埋深最浅，向东逐渐增加，直至桩号230千米增至35km。速度值为6.8km/s至7.5km/s。下地壳底界为强速度梯度层，速度梯度值为每公里0.2km/s。

2. 壳内低速层分布及其标志

在辽南地区地壳与上地幔结构研究过程中，发现的一个重要特征之一，是壳内低速层的存在，识别和确定本区壳内低速层存在的主要标志是：

(1) 来自低速层顶部及底部宽角度反射波的存在，由此而确定的该层速度值比相邻地层速度值明显降低。

(2) 一般在距爆破点80千米处， P_s 波消失，这一现象强烈受速度梯度和地壳最上部衰减的影响。

(3) 无论在均匀或非均匀介质条件下，设计的理论速度模型通过剥皮法、理论走时拟合、射线追踪和理论地震记录图等多种正、反演计算，确定壳内低速层存在。

本区壳内低速层分布于中层地壳内的15—23km深处。一般情况下，厚度为4—5km，速度值一般为6.1—6.2km/s，与上、下层速度差分别为0.1—0.2km/s。速度逆转最显著的部位位于新立(桩号40千米附近)至析木(桩号120千米附近)地段内，在这里该层呈囊状透镜体状，中部厚度最大处达7km，速度为6.0—6.1km/s，与上、下层速度差达0.2—0.3km/s，这一特征反映了该处介质的特殊性。

三、地壳与上地幔介质电性结构

为了研究辽南地区地壳与上地幔介质的电性结构，沿闾阳—海城—东沟剖面布设了八个大地电磁测深点，取得了该剖面地壳与上地幔电性结构资料。通过对每个测点视电阻率曲线的反演拟合解释获得本区地壳与上地幔岩层电性分层，构绘出了岩层电性剖面。从图7中可见，在下辽河平原内的莫霍面之下约40km深处有一高导薄层发育，厚2—4km，电阻率值4—11Ωm。然而在下辽河平原以东海城震区一带，莫霍面之下的高导薄层消失，但壳内出现了明显的高导薄层，其顶界埋深15—17km，电阻率值4—6Ωm，厚3—5km。这一位置与壳内低速层大体一致。

沿闾阳—海城—东沟剖面，普遍发育有上地幔高导层。在下辽河平原之下，该层显著上隆，顶界埋深86—88km。向西迅速下倾，在下辽河平原西侧闾阳测点之下，已深达110km。但向东下倾比较缓慢，海城震区位于上地幔高导层隆起的东翼斜坡带上。在剖面东端辽东半岛的岫岩一带，该高导层顶界埋深达115—120km。可见，上地幔高导层顶界埋深的变化趋势与新生代以来的构造格局具有良好的对应关系。

四、地壳与上地幔介质密度结构

密度是地壳与上地幔结构的重要物理参数之一，研究密度结构是认识本区地壳与上地幔介质不均匀性的一项重要内容。

通过速度—密度关系公式的建立¹⁾及沿闾阳—海城—东沟剖面二维速度结构中所取得

1) 卢造勋、刘国栋等，1987. «辽南地区地壳上地幔介质的横向不均匀性及其与构造活动动力源关系的研究»总结报告。

的多个一维速度模型，求取了沿剖面的地壳与上地幔密度分布，相应获得了沿剖面的多个一维柱状密度分布模型，其深度范围为地表至 40km。将多个一维垂向非均匀密度结构模型综合为沿剖面的二维密度结构。为了进一步探讨上述结构的可靠性，采用多边形近似二度体的计算方法^[4]，反演了沿剖面的布格重力异常，计算过程中逐步修改密度结构模型，使理论异常值与实测异常值拟合。图 7 中反映了地壳与上地幔顶部不同层位的平均密度值分布特征。从图中可见，辽宁地区地壳与上地幔介质的密度结构无论在纵向及横向都是不均匀的。其基本特点为：辽宁地区按地壳密度分布可分为五层，与速度分层相对应。密度变化最显著的地段分布在辽河平原与辽东半岛的过渡地带，在此中层地壳上部存在明显的低密度层。这里出现的重力正异常，是由上地幔高密度层的隆起起了主导作用的结果。尽管辽宁地区地壳与上地幔密度存在明显的横向非均匀性，但就平均统计而言，辽宁地区地壳介质密度的平均值为 $2.7\text{--}2.8\text{kg/m}^3$ ，上地幔顶部介质密度平均值约为 3.32kg/m^3 ，与 Wotzel 和 Shwrbet^[5] 得出的单一壳层密度为 2.84kg/m^3 及 Adams 提出紧靠地壳的上地幔顶部密度约为 3.3kg/m^3 大体相近。

五、地壳与上地幔介质温度结构

闾阳—海城—东沟剖面是一条综合地球物理剖面。根据大地热流测量结果，并结合二维速度结构剖面，作为计算该剖面温度场模型的主要依据。在温度场计算中仅考虑热的传导效应。根据热传递的基本关系即付里叶定律，用二维空间的热传导方程，采用逐步逼近法^[6]，获得了沿剖面地表至 200km 深处地壳与上地幔的温度场分布（图 8）。从中可见并根据计算结果分析，辽宁地区地壳与上地幔温度结构具有以下特点：

1. 古城子至析木（即下辽河平原与辽东半岛的过渡地带）一带壳内高导-低速层（15—22km）具有较高的温度值（ $500\text{--}640^\circ\text{C}$ ），比两侧同一深度上的温度值高出 $130\text{--}200^\circ\text{C}$ 。再结合该层有较高的热产生率值，推测这里可能有部分熔融的残留体存在。
2. 过渡区范围内的岩石圈温度值最高，下辽河平原次之，辽东半岛最低。郯—庐断裂带地段温度值又较周围地区明显偏高。其莫霍面处温度值为 720°C ，而下辽河平原处为 670°C ，辽东半岛地区为 600°C 。这可能表明郯—庐断裂带是一条深断裂，它对传递地幔温度起着某种通道作用。
3. 辽东半岛和下辽河平原的莫霍面处热流值分别为 29 和 38mw/m^2 ，说明地表热流值有 55% 是由上地幔提供的。而在过渡区范围内莫霍面处的热流值为 25mw/m^2 ，与辽东半岛接近。但它仅占地表热流值的 30%，这说明过渡区的高热流值基本上是由壳内的高导-低速层提供的。
4. 根据最后拟合结果选定的热产生率值，在整个剖面的上地壳范围内热产生率值都不高。辽东半岛为 $0.25 \times 10^{-12}\text{Calcm}^{-3}\text{s}^{-1}$ ，过渡区和下辽河平原为 $0.35 \times 10^{-12}\text{Calcm}^{-3}\text{s}^{-1}$ 。它们明显的低于花岗岩的热产生率值。据此，是否可以推测，这里上地壳的原岩建造主要是沉积岩类，尤其是辽东半岛地区。

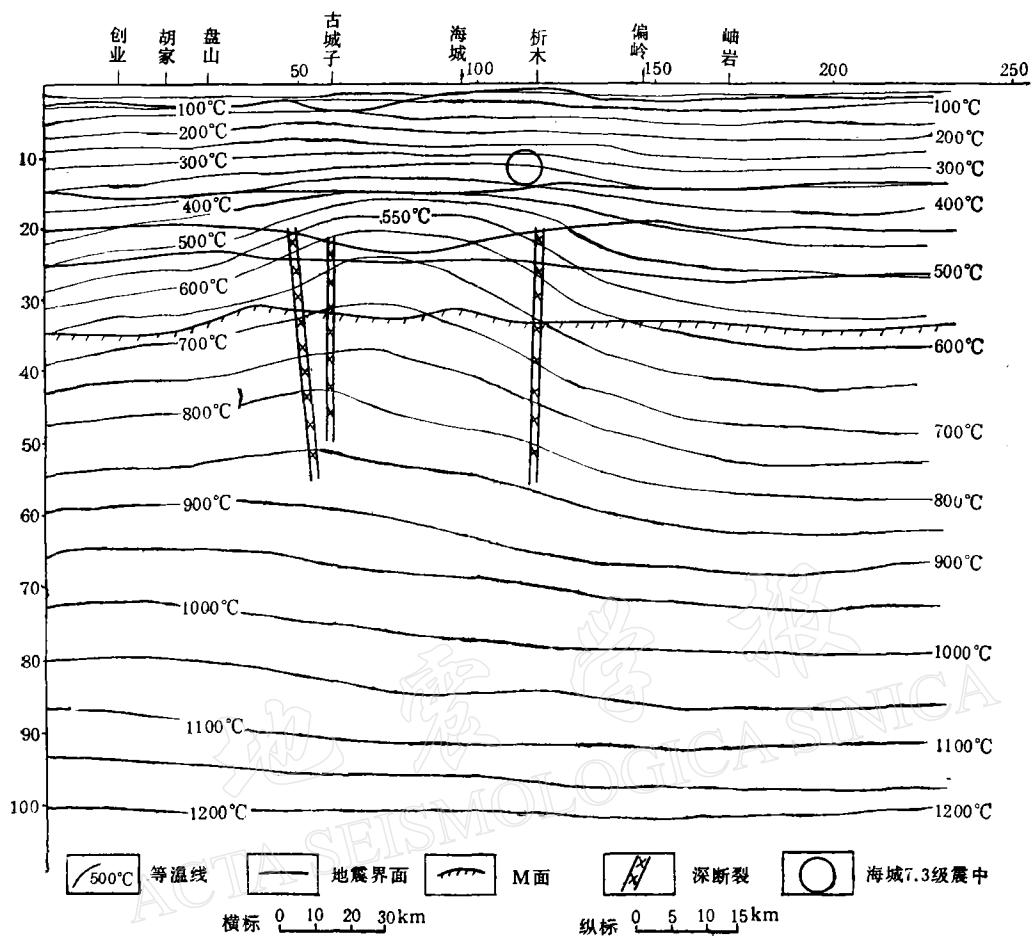


图 8 阎阳—海城—东沟剖面地壳与上地幔温度结构图

六、地壳与上地幔介质的横向非均匀性及其与地震活动的关系

通过对阎阳—海城—东沟剖面地壳与上地幔介质速度、电性、密度、温度等结构和重力、地热、航磁等异常的分析研究,不仅发现该区地壳与上地幔构造有其本身的重要特点,而且地壳与上地幔介质存在明显的不均匀性。沿剖面的深部构造、地球物理异常及其对比关系见表2。与地表地质对应关系见图7。从表2及图7可以看出: 辽南地区地壳与上地幔介质横向不均匀性最为显著。深部结构异常分布的地段,为阎阳—海城—东沟剖面桩号的50—120范围,即古城子至析木一带,宽度约为70千米,处于包括辽河平原东侧在内的平原与辽东半岛的交界地带范围,异常有较好的对应性。海城地震区四级以上地震震源均位于古城子—析木地段的中层地壳上部,而且与低速囊体、低密度层、高温梯度层、高热流异常、深断裂等多种深部地球物理异常,在空间上有紧密的相关性。海城7.3级地

表 2 辽南地区地壳与上地幔结构异常分布

序号	重要地球物理异常	分 布 位 置		主 要 特 征
		桩号及地名	深度范围(km)	
1	上地幔局部凸起带	90 耿庄带	32—34	顶点地壳厚度 32km, 其幅度为 1—5km 宽度为 20km 左右, 西翼缓, 东翼陡
2	析木深断裂	120 析木一带	超壳深断裂	断距 1km 左右, 东侧为上升盘, 西侧介质速度差异较大
3	郯庐深断裂北段	I 52—54 II 60—62	超壳深断裂	东盘下降, 断距约 2km; 西盘下降, 断距大于 3km 为破碎带
4	壳内低速层	50—120 新立至析木	15—22	最低纵波速度近 6km/s, 与上、下层速度差为 0.2—0.4km/s
5	壳内高导层	60—120 古城子至析木	15—20	电阻率值为 4—6 Ω m, 周围介质为 10³ Ω m
6	上地幔顶部高导层	—40—60 闾阳至古城子	顶界 40—45	电阻率值为 4—11 Ω m, 周围介质为 10³ Ω m
7	上地幔高导层	整个剖面	顶界 87—120	电阻率值为 1—5 Ω m, 周围介质为 10³ Ω m
8	壳内低密度层	40—120 新立至析木	15—20	与周围介质密度差为 0.02—0.04kg/m³
9	高热流异常	70—120 耿庄至析木	顶界	海城地震区为高热流异常区, 最高热流值达 94 mw/m²
10	壳内高温度梯级带	40—120 新立至析木	5—35	15—22km 深度的温度值比邻区同一深度值高 130—200°C
11	高重力异常	70—100 牛庄至海城	—	异常幅度为 $10 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$
12	高航磁 ΔT_a 异常	85—100	--	双峰值高磁 ΔT_a 异常
13	形变梯级带	70—100 牛庄至海城	—	北东向形变梯级带与北西向形变梯级带在此交汇

震震源正处于低速囊体的东端点, 壳内高导层顶部附近, 并有析木深断裂切割。其下方的深部构造背景正处于辽河上地幔隆起带东侧局部上地幔凸起的东翼斜坡带上。这些相关现象为研究构造动力源提供了重要的基本条件。至少下述条件与海城地震的发生密切相关:

1. 海城地震区位于辽南上地幔隆起东部斜坡背景上的一个局部上地幔凸起带东侧。在地表处于辽河平原与辽东半岛的接壤地带。我国其它若干地震大都与沉积拗陷的周边地段有关, 这很可能由于地壳中存在着物质交换, 因而引起应力积累造成的。由于重力均衡调整的结果, 沉积盆地中物质的亏损是由于地幔物质的隆起加以补偿的, 结果就导致了盆地下面的地壳变薄。在辽河平原的地壳厚度仅 31—32 千米, 而其两侧达 34—35 千米。那么, 变薄过程中地壳(特别是地壳中部)的物质到哪里去了呢? 唯一的可能是向两侧蠕动, 这种物理过程很可能正是由地壳中的软弱层(如低速层)来完成的。一旦这种蠕动受阻, 如深大断裂, 则就会造成应力积累, 待这种积累到一定程度之后就会造成突变, 而发生地震。

2. 海城地震区的中层地壳里,存在明显的高导层和低速层,两者的位置大体一致。本区相对应位置高热流的分布,说明该层很可能为塑性层。低速-高导层的存在,一方面是构造活动区的标志;另一方面,它的存在有利于在上层地壳中积累应力。近年来,世界大陆内部地震活动区的深部探测结果已表明,大陆浅源地震几乎都发生在壳内低速层或高导层之上,对这种现象可以作这种解释。根据近代有限元法计算壳内应力场分布表明,如果脆性上地壳的下部是一个塑性层,那么当这个体系受到力的作用时,上部脆性地壳的应力水平得到加强,这是因为塑性层中的流变不消耗应力,并将其所受到的力转移给上部的脆性地壳。这种应力增强作用与塑性层跟脆性层的厚度呈正比关系。并且塑性层中的粘滞度越小,应力转移的时间越短^[7]。前已述及,海城地震(包括前震、余震)震源一般均位于该区低速-高导层上方的脆性地壳内。从下部传递应力角度来看,无疑对地震的孕育和发生从一方面提供了力源条件。

3. 海城地震区一带,不仅地表热流高,而且地壳与上地幔顶部的温度结构存在明显的横向不均匀性。这里温度显著增高,特别是中层地壳内部。全球热流资料表明,热场的分布与地壳运动和构造活动性之间有着密切的关系^[8]。热流高的地区,一般为地壳活动区。而且地壳内部温度分布的不均匀性,对一个地区的构造稳定程度影响较大。海城地震区热流值高,温度场分布的不均匀性,说明这里是地壳活动、构造稳定性较差的地区。

研究资料表明,地壳中温度结构的横向不均匀性,可以导致热弹应力的产生,给地震提供力源。辽南地区地壳介质与地温横向差异最大的地带,正处于古城子至析木一带,这里正是海城地震区所处位置。近来有人提出地震的发生过程和矿床的形成互有联系^[9],认为地震活动是在受深大断裂控制的液相矿床形成的整个过程中出现。其基本设想为:当地震前,由于地壳内应力场的变化,使储存于地壳深部的高温水发生运移和相变,高温水相变时必然放出巨大能量,形成强大的热应力而促进地震发生。海城地震区的地壳结构条件(如中层地壳中的低速-高导层、深断裂、热异常),对热弹应力的产生是有可能的。因此,深部地热异常给海城地震的发生亦可提供力源。

4. 海城地震区西侧的古城子一带,在地壳浅部存在牛居-油燕沟断裂,而在深部则有超壳深断裂存在,地震区东侧则有析木超壳深断裂。由两大深断裂所控制的范围,正是地球物理场和深部结构显示异常的地区,海城地震正发生在这一异常块体内。牛居-油燕沟超壳深断裂附近地温高、低速层厚、壳内高导层深度突变等地球物理异常事件,说明它是区域地质构造的分界线,也可能是历史上不同地质时期地幔物质上涌的主要通道。而析木深断裂很可能起了阻碍物质对流的作用,而导致应力集中。无论如何,这两大断裂在力源方面所起的作用是不可忽视的。

上述四个方面可能是在整个华北应力场背景下讨论海城地震孕育、发展和发生整个力学过程的一些局部条件。尽管对它的认识还有待于继续深化,但它至少可以作为我们认识问题的基本事实。

本工作系地震科学联合基金会资助项目。

参 考 文 献

- [1] 卢遵勋、张国臣、李竟志、王连仲、赵俊猛, 1987. 中国海城地震区地壳与上地幔构造特征的研究. 长春地质学院报, 17, 1, 99—107.
- [2] 王安东、任玉河、孙文福、于龙伟、梁镜明、曹天清、顾浩鼎, 1987. 辽东地区和海城地震区的地热观测. 地震学报, 9, 392—405.
- [3] 刘昌铨、嘉世旭, 1986. 唐山地震区地壳上地幔结构特征. 地震学报, 8, 341—353.
- [4] 长春地质学院重力教研室, 1980. 重力勘探, 176—191. 地质出版社.
- [5] K. E. 布伦, 1982. 地球的密度, 59—63. 地震出版社.
- [6] C. S. 德赛、J. F. 阿贝尔, 1987. 有限元法引论, 121—234. 科学出版社.
- [7] 刘国栋, 1984. 关于地壳上地幔结构研究的某些新进展(二). 地震学刊, 2: 17—22.
- [8] 黄尚瑶、胡素敏、马兰, 1986. 火山温泉地热能, 44—95. 地质出版社.
- [9] Губергап, Щ. А., Пиковский, Ю. И., 1986. 发震断裂枢纽和油气田分布规律. 地震地质译丛, 8, 1, 38—41.

LATERAL INHOMOGENEITY OF CRUST AND UPPER MANTLE IN SOUTH LIAONING, CHINA AND ITS RELATIONSHIP WITH THE $M 7.3$ HAICHENG EARTHQUAKE

LU ZAOXUN¹⁾, LIU GUODONG²⁾, WEI MENGHUA²⁾, MENG PUZAR¹⁾ and ZHAO JUNMENG¹⁾

1) Seismological Bureau of Liaoning Province

2) Geological Institute of State Seismological Bureau

Abstract

Based on geophysical explorations conducted in South Liaoning, China in recent years, the velocity structure, electric structure, density structure and thermal structure, of the crust and upper mantle in South Liaoning have been obtained. The lateral inhomogeneity of the important characteristics of the deep medium in this area have been set forth by forward and inverse calculation of the data of D.S.S., geomagnetic deep sounding, gravity, aeromagnetic survey and heat flow etc.

It has been discovered that there exists a train of key geophysical anomalies of low wave velocity, high conductance, low density, high heat flow etc., which are consistent quite well in space with the Haicheng earthquake hypocentral area. They furnish very important practical evidences for analysing the physical process of a strong earthquake.