

利用华北北部深部地球物理资料 数值模拟地壳应力场^{*}

刘昌铨 刘明军 嘉世旭

(中国郑州 450003 国家地震局地球物理勘探中心)

摘要 利用华北北部近 20 多年的地震测深资料进一步深化分析解释, 结合其它地质、地球物理资料, 给出地壳分层结构, 求得弹性力学参数, 得到三维有限单元的地壳模型。参考区域构造应力场, 在考虑重力影响的情况下, 对模型边界作适当约束, 利用线弹性三维有限单元程序进行各节点位移和各单元应变、应力计算。通过分析上、中、下地壳各层的最大主压应力等值线图, 探讨地壳应力场的分布特征与地震的关系。

主题词 地震测深 地壳应力 地震活动性 华北北部 三维有限单元

引言

华北北部是我国东部主要地震活动区之一, 其震源深度大都发生在上地壳的下部至中地壳的上部。多年来, 诸多作者根据地震台网测震、地形变观测等资料, 从不同学术观点研究华北地区地壳应力场变化与地震活动的关系, 获得了若干具有重要意义的结论。其主要论点一致认为, 华北地区存在一个一致性相当好的应力场, 最大压应力轴为北东东向, 最小压应力轴为北西西向, 并且都近水平向(鄢家全等, 1979; 汪素云, 陈培善, 1980; 李钦祖, 1981)。近 20 多年来, 在华北北部获得 30 余条、万余公里深地震宽角反射剖面和数条约 300 km 近垂直反射剖面资料, 取得了丰富的地壳深部构造信息。为了本项课题研究的需要, 选择了其中 13 条长剖面、约 8 000 km 的深地震宽角反射测深资料, 从震相识别到二维射线追踪正反演计算进行了统一的解释, 其中对最新观测的忻州—泰安(H-19)和北京—怀来—丰镇(H-21)两条剖面分别做了 P 波和 S 波的联合解释(嘉世旭, 刘昌铨, 1996)。与此同时, 又沿 7 条区域性深地震测深剖面(总长度约 3 000 余公里)开展了重力、地震测深二维非均匀块体密度反演计算(刘昌铨等, 1996), 得到了较为翔实的深部地球物理资料, 为确定三维有限单元的弹性力学参数、地壳应力场计算提供了可靠的依据。在三维有限单元地壳应力场单元划分时, 又吸取应用了通过研究区域的地学断面和新构造变动等最新研究成果(马杏垣等, 1991a, b)。

* 地震科学联合基金资助课题(85100101)。国家地震局地球物理勘探中心科技论著编号 RCEG 97013。
1997-08-04 收到初稿, 1997-12-17 收到修改稿, 1998-01-10 决定采用。

1 华北北部区域地质构造和地壳结构

华北北部(东经 $113.0^{\circ} \sim 120.0^{\circ}$, 北纬 $35.5^{\circ} \sim 42.0^{\circ}$)区域地质构造(邓起东, 范福田, 1980), 西部从鹤壁—北京—石家庄一线以西为太行隆起地区; 北部从张家口—北京至秦皇岛一线以北为燕山褶皱带; 东南部为鲁西隆起、胶东隆起; 其中部为华北新生代裂谷盆地(图 1).

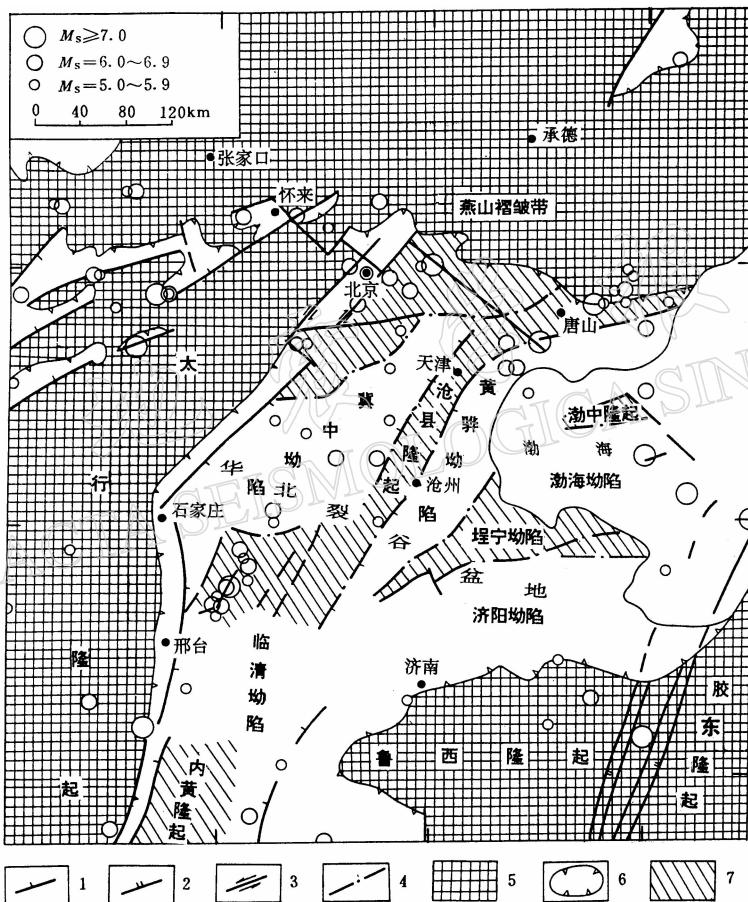


图 1 华北北部地质构造图

1. 活动性正断层;
2. 活动性逆断层;
3. 活动性平移断层;
4. 活动断层和隐伏断层;
5. 隆起区;
6. 新生代盆地界线;
7. 盆地中隆起(本文附图中地震起止时间为公元前 231 年至公元 1994 年 3 月 31 日, 引自国家地震局分析预报中心数据库)

根据地震测深结果(嘉世旭, 刘昌铨, 1995), 研究区的地壳可分为上、中、下 3 层, 它们是: 上地壳厚度一般为 $8 \sim 13$ km. 华北裂谷盆地内上地壳厚 $9 \sim 13$ km, 冀中和渤海坳陷内 $12 \sim 13$ km, 太行山和燕山山区仅 $8 \sim 11$ km(包括延怀盆地的范围). 从研究区整体来看, 上地壳是由沉积岩层和结晶基底低变质岩系所组成的脆性地壳(马杏垣等, 1991b).

中地壳厚度一般为 $10 \sim 22$ km. 华北裂谷盆地内为 $10 \sim 14$ km, 并较普遍分布有低速度层和低速度块体(刘昌铨, 嘉世旭, 1986; 刘昌铨等, 1997a, b), 而在太行山以西和燕山

山区中地壳明显增厚至 16~22 km. 研究区内的中地壳是由低力学强度的混合岩和角闪岩组成(马杏垣等, 1991b).

下地壳厚度在华北裂谷盆地内一般为 6~9 km, 周边山区迅速增至 11~14 km, 是以麻粒岩为主, 能传递相对高流动应力的塑性岩层组成(马杏垣等, 1991b).

总的来说, 华北北部研究区域地壳厚度由东向西、由南向北逐渐增厚. 在裂谷盆地内莫霍面有局部起伏, 但变化不大, 深度一般为 30~33 km. 沿太行山山前向西、燕山山前向北约 100 km 区间内, 地壳厚度从 33 km 迅速增加到 40 km, 在研究区西北部地壳厚度增大至 44 km 左右.

2 地壳应力场的计算

2.1 方法简介

利用三维有限单元法数值模拟复杂构造应力场是一种有效的数值方法(宋惠珍等, 1989). 本文所采用的三维线弹性有限单元计算机程序源于国际通用的线性弹性有限单元计算程序 SAP5, 三维线性弹性有限单元静力分析方法仅是 SAP5 程序的一部分内容. 为了适应地球科学要求, 在程序中加入了重力平衡力的计算功能. 该程序单元模型为 8 节点六面体等参单元(包括退化单元, 即五面棱柱和四面锥体单元). 载荷和边界条件的处理包括: 节点位移边界条件、节点集中力载荷、边界面力载荷等; 计算结果输出各节点上 3 个位移分量、各单元重心上的 6 个应变分量、6 个应力分量以及对应的 3 个主压应力和各主压应力的方向角.

计算结果得出的带负号的应力值是表示压应力值, 这是三维有限单元数值模拟程序自身约定的. 因此, 在研究区上、中、下地壳最大主压应力场等值线图中的等值线数值均带有负号.

2.2 弹性参数计算

在进行线性弹性三维有限单元应力场计算时, 每个单元的杨氏模量 E 、泊松比 δ , 可以由弹性介质中弹模参数与速度的关系式给出

$$\begin{aligned} v_p &= \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2} \\ v_s &= \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2} \\ E &= \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \\ \delta &= \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \end{aligned}$$

式中, λ, μ 为拉梅系数. 经简单变换, 用速度 v_p 、密度 ρ 和波速比 $\gamma (v_p/v_s)$ 表示的弹模参数为

$$E = \frac{\rho v_p^2 (3\gamma^2 - 4)}{\gamma^2 (\gamma^2 - 1)} \quad \delta = \frac{\gamma^2 - 2}{2(\gamma^2 - 1)}$$

根据测深结果, 利用速度 v_p 、波速比 γ 和密度 ρ (由布格重力异常二维反演获得. 刘昌铨等, 1996)计算出相应区域的弹模参数(见表 1).

表 1 华北北部三维有限单元的速度及弹模参数

分层参数	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	II ₁	II ₂	II ₃	II ₄	II ₅
$v_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	5.7	5.1	5.7	5.6	4.5	4.5	5.2	5.0	5.6
上地壳 $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.73	2.64	2.73	2.69	2.55	2.55	2.64	2.57	2.68
地壳 γ	1.732	1.750	1.730	1.740	1.745	1.760	1.732	1.740	1.750
壳 E/MPa	73 915	56 394	74 037	69 847	42 582	42 063	59 488	53 198	69 024
δ	0.250	0.258	0.249	0.253	0.256	0.262	0.250	0.253	0.258
$v_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	6.30	6.25	6.20	5.90	6.15	6.15	6.30	6.23	6.35
中地壳 $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.86	2.83	2.82	2.75	2.80	2.80	2.86	2.82	2.90
地壳 γ	1.735	1.760	1.740	1.780	1.740	1.770	1.735	1.740	1.760
壳 E/MPa	94 369	90 050	69 754	76 706	87 686	85 562	94 369	90 625	95 254
δ	0.251	0.262	0.253	0.269	0.253	0.266	0.251	0.253	0.262
$v_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	6.65	6.55	6.67	6.35	6.52	6.63	6.56	6.56	6.58
下地壳 $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.95	2.90	2.98	2.90	2.96	2.98	2.94	2.94	2.92
地壳 γ	1.732	1.750	1.730	1.800	1.800	1.800	1.780	1.780	1.800
壳 E/MPa	108 702	102 180	110 664	92 161	99 172	103 239	101 380	101 380	99 640
δ	0.250	0.258	0.249	0.277	0.277	0.277	0.269	0.269	0.277

2.3 单元划分

单元划分是建立在地壳结构和弹模参数计算的基础上, 同时也参考马杏垣(1989)、河北省地震局(1986)以及研究区周边地质构造研究成果, 研究区分成上、中、下地壳和上地

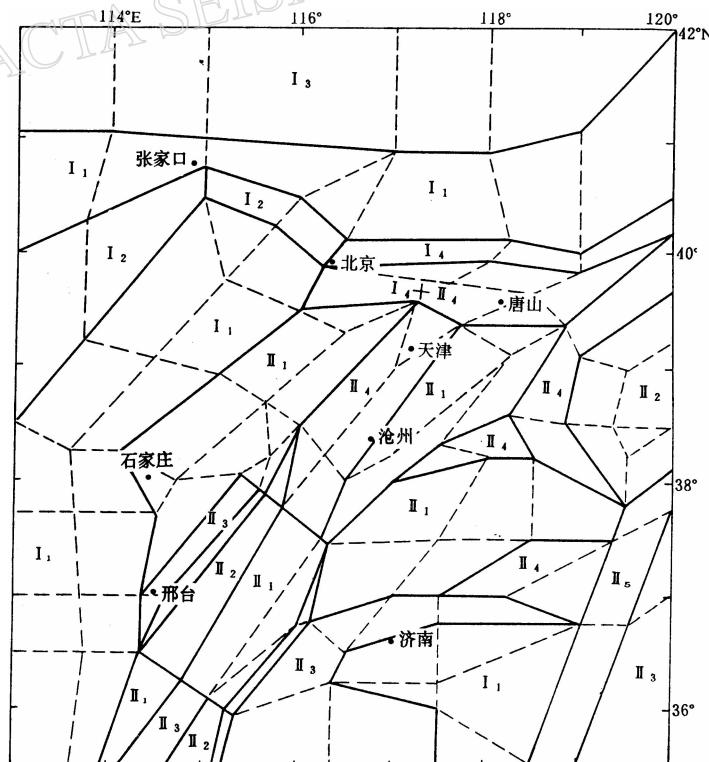


图 2 华北北部三维有限单元划分平面图

幔顶部 4 层立体模型。模型顶面为地表, 各点高程直接输入模型参加计算, 底界面为 50 km 深的平面, 周围为垂直面。在平面上, 研究区分成隆起区 I 类(燕山褶皱带、太行隆起区和鲁西隆起等)和坳陷区 II 类(华北裂谷盆地、渤海坳陷等)。进一步详细划分为 3×9 类不同的速度 v_p 和弹模参数单元块(见表 1)。上地幔顶部为 III 类, 采用统一的速度、弹模参数($v_p = 8.1 \text{ km/s}$, $\rho = 3.36 \text{ g/cm}^3$, $\gamma = 1.80$, $E = 173\,745 \text{ MPa}$, $\delta = 0.277$)。同一层相邻单元分界均为垂直面, 各层的单元划分平面图均相同, 这样共划分出 4×109 个单元、 5×114 个节点, 单元划分平面图见图 2。

2.4 边界约束条件

本文三维有限单元地壳模型考虑了重力的影响, 并模拟实际情况对模型边界作了不同的约束。具体计算过程中, 首先对华北北部有限单元地壳模型四周边界和底界面进行法向自由度刚性约束, 地表为自由面, 计算出在净自重作用下的弹性应力场, 求得各节点的位移分量和各单元重心上的 6 个应力分量。经过多种约束条件的试算, 最后确定解除南、北和东三边界法向自由度刚性约束, 并在这些面上施加相应单元的重力平衡力和外力。具体方法是: 在东边界 x 方向上施加相应单元的 σ_z ; 在南、北边界 y 方向上施加 $0.85\sigma_z$, 其中 σ_z 是在净自重作用下求得的垂向(z 方向)正应力。由于净自重作用下的 σ_z 为压应力, 其值远大于 σ_x 、 σ_y , 这样, 南、北和东三界面上不仅有重力平衡力, 还有外加的压应力。相对而言, 在东界面施加的压应力值大于在南、北界面上所施加的压应力值; 而西面和底面均保持法向自由度刚性约束。进行上述边界约束的理由是: ① 研究区甚至研究区以外更大范围内的区域构造应力场主要受北东东向水平应力场控制; ② 西部界面法向自由度刚性约束, 是考虑到在西部太行山隆起区地表为高原山区, 莫霍界面下凹, 地壳急剧增厚, 对地壳模型水平位移有阻挡作用; ③ 底界面法向自由度刚性约束, 在底面对重力起到平衡作用。

3 计算结果

应力是张量, 某一点的应力状态需用应力椭球体才能完整表达, 而用此方式来分析众多单元的应力状态显然很难实现。根据计算结果, 对各类应力(最大、中间、最小主压应力、平均应力、剪切等应力)等值线图进行了对比, 这些图件所反映的地壳应力场特征基本相似。本文利用最大主压应力等值线图, 同时参考其它结果, 分析地壳最大主压应力场的相对变化及其与地壳分层构造的关系。

3.1 上地壳主压应力场

在上地壳最大主压应力等值线图(图 3)中明显的应力梯度带: ① 与太行山山前断裂带走向相对应的北京—石家庄—邢台应力梯级带。该带等值线密集分布, 石家庄以南呈近 SN 走向延伸, 而在石家庄至北京段则为 NE 走向延伸。该应力梯级带以东的应力值较低, 其相应的地质构造单元为华北裂谷盆地; ② 张家口—北京—唐山 NW 向应力梯级带。该带以南的华北裂谷盆地应力值相对较低, 燕山褶皱带和内蒙地轴范围的应力值较高。与 NW 向应力梯级带相对应的是北京—蓬莱断裂带(徐杰等, 1985), 这也是一条在研究区内中强地震较为密集分布的地震带。该应力梯级带, 大致在北京以南与北京—石家庄—邢台应力梯级带近似成“丁”字形交汇。

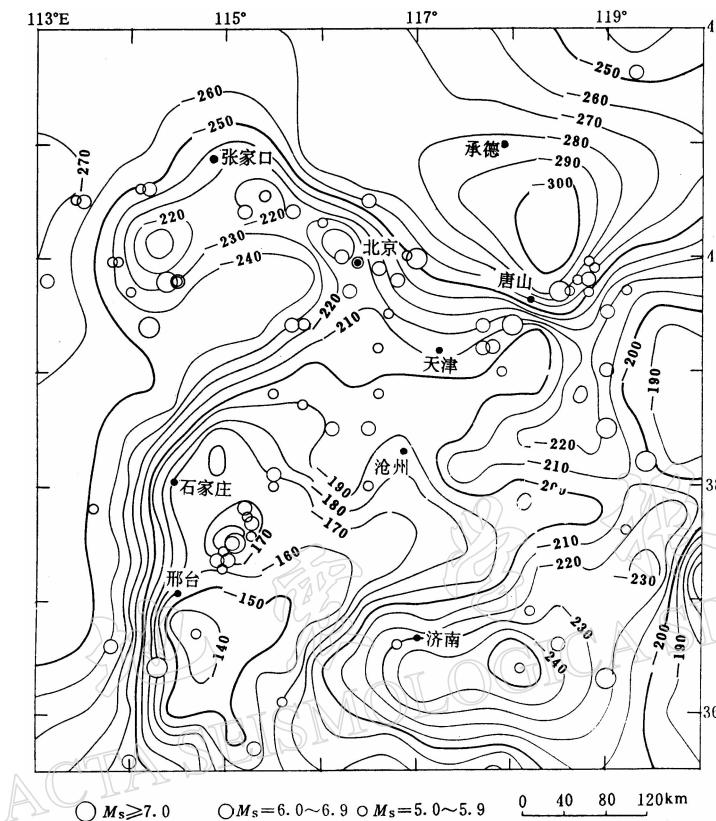


图3 华北北部上地壳最大主压应力等值线图(应力单位: MPa)

研究区东南部的鲁西隆起和胶东隆起范围内应力等值线呈圈闭, 应力值为相对较高特征。唐山以北地区上地壳最大主压应力值为全区最高, 达-300 MPa, 向南、东南约80 km区间迅速降为约-200 MPa, 唐山地震区处于该过渡带区域。

邢台东南部临清坳陷的范围是研究区上地壳主压应力值的最低值区(约-140 MPa), 东北部宁晋凸起为局部高值区(约-180 MPa), 邢台地震区处在该局部高值圈闭区。

张家口以南上地壳最大主压应力等值线图中, 分布有NE向相对低的等值线圈闭。在地质上, 属于山西断陷带最北的延怀盆地, 它与华北裂谷盆地形成构造演化过程截然不同。前者是隆起区内部的小型断陷盆地, 应力值相对偏高, 其最大主压应力等值线圈闭与外围形成的应力梯级带, 迅速向应力高值区过渡, 仅在东南角以应力等值线“鞍部”形态向华北裂谷盆地过渡。延怀盆地的地震多发生在上地壳最大主压应力低应力圈闭外围的梯级带上。

张连甲和黄立人(1989)根据怀来、延庆地区水平形变场研究结果, 认为以南口—孙河断裂向西北延伸的关沟隐伏断裂为界, 东北一侧形变以挤压为主, 剪切应变不明显(恰好相当于图3中张家口—北京一线以北应力梯级带的范围); 而西南一侧的情况恰好相反, 形变以拉张为主, 剪切应变较为明显(相当于图3中延怀盆地低应力等值线圈闭的范围)。

区域应变等值线的优势方向为北西向, 它与主压应力场梯度带的方向基本一致, 这表明本区形变主要受北西向的构造控制.

总之, 从华北北部上地壳最大主压应力等值线可以看出, 隆起区的应力值高; 盆地中的应力值较低, 盆地中局部隆起的应力值相对偏高, 如埕宁、沧县隆起等. 盆地中坳陷内的应力值最低, 如临清、渤海、济阳坳陷等. 上地壳最大主压应力图中, 应力等值线圈闭较多, 它是区域地质构造条件制约的结果.

万素凡和桂昆长(1992)利用大地形变测量的观测成果, 定量研究得到了华北平原伸展裂陷区的垂直形变图. 图中显示华北裂谷盆地的西部、北部基岩出露地表的隆起区继续上升(相当于上述 SN-NE、NW 应力梯级带), 盆地内不断下沉(裂谷盆地内低应力区). 同时又指出, 盆地内下沉并非是一种匀速过程, 在大面积下沉的背景中存在部分分散而具有一定升降对峙图形的隆起或相对隆起, 呈现的是升降并列; 对空间分布有序的形变迁移, 被认为是伸展区构造形变的主要特征, 代表了大型铲式正断层现今活动的观测结果. 这种现象均能与研究区上地壳主压应力场的分布特征相对应. 这预示以水平主压应力为主的上地壳最大主压应力场中尚蕴含着部分垂向应力的影响, 下面讨论应力方向时进一步说明.

3.2 中地壳主压应力场

图 4 为华北北部三维有限单元数值模拟中地壳最大主压应力等值线图, 它与上地壳最

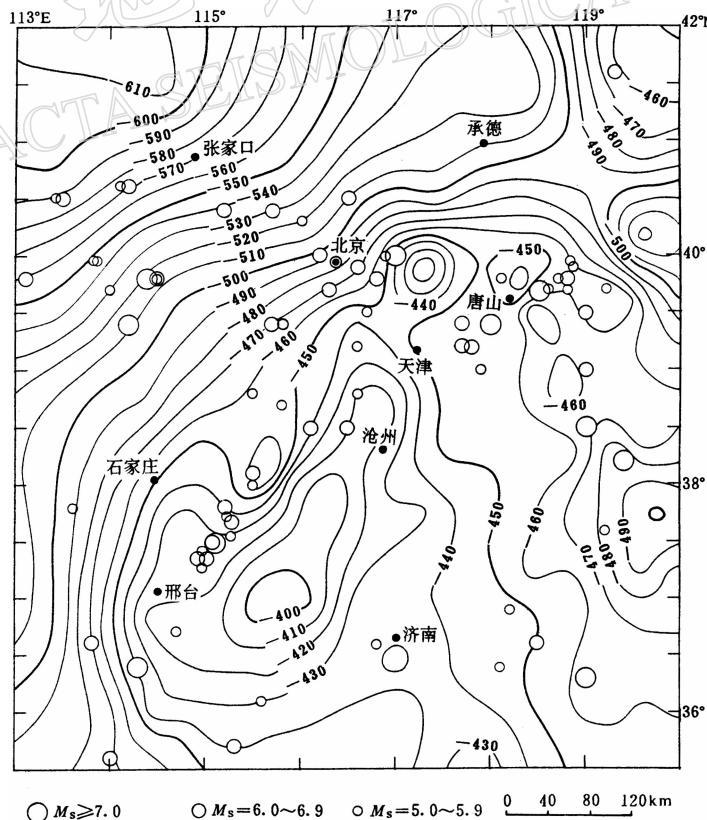


图 4 华北北部中地壳最大主压应力等值线图(应力单位: MPa)

大应力等值线图相比, 等值线形态较为简单, 更具规律性。上地壳的最大主压应力等值线图较细致地反映了上地壳浅部各地质单元走向、形态和规模, 而在中地壳这种对应关系迅速减弱。如图 4 所示, 延怀盆地、鲁西隆起、宁晋隆起等在上地壳内应力等值线圈闭在中地壳退化、消失, 等值线只表现为相应区域走向上的折曲变化。中地壳最大主压应力等值线图主要反映了太行以西、燕山以北的隆起区与华北裂谷盆地的构造特征。研究区(图 4)的西部、西北部, 即邢台—石家庄—北京以西和北京—唐山北一线以北的区域, 主压应力梯级带呈 SN-NE 向, 主压应力值从 -460 MPa 向西北较均匀地增至 -600 MPa, 反映了太行山隆起区、燕山褶皱带的中地壳向西北明显增厚(由 12 km 增至 22 km); 中部华北裂谷盆地主压应力值为 $-400\sim-430$ MPa, 变化不大; 东南部鲁西、胶东隆起偏高, 主压应力值为 $-430\sim-490$ MPa。

大致相当于临清坳陷和冀中坳陷的范围, 应力等值线呈北北东向的圈闭, 其压应力值向圈闭中心递减, 即从边缘 -440 MPa 减至 -400 MPa。邢台地震区位于该压应力圈闭的西侧梯级带上。三河、唐山地震区, 中地壳最大主压应力等值线呈近 EW 向圈闭, 其圈闭中心应力值相对较小, 约为 -420 MPa。三河、唐山一带, 历史上若干次大震均位于该圈闭的周边分布。中地壳主压应力值在该区偏小, 可能与中地壳低速块体分布有关(刘昌铨等 1996)。

环渤海地震区在中地壳应力等值线图中, 亦具有上述类似的现象, 但由于渤海内缺少深部探测资料, 详情有待进一步研究。

延怀盆地位于中地壳主压应力等值线梯级带、由 NE 向至近 EW 的转折部位, 与上地壳主压应力等值线形态有明显差别。该区地震震源深度优势分布范围为 $8\sim10$ km(刘昌铨等, 1997b), 即相当于上地壳的底部。因此, 该区中地壳主压应力等值线的分布与地震活动的关系不十分密切, 这一现象有待进一步研究。

3.3 下地壳主压应力场

图 5 为华北北部三维有限单元下地壳最大主压应力等值线图, 其图象与图 4 较为相近, 从张家口向北京、天津递减的主压应力梯级带在图中占主导地位。大致相当于渤海坳陷的范围形成低应力值等值线圈闭, 最小应力值为 -700 MPa。这里应力等值线的分布特征与莫霍面埋深的等值线分布极为相似。可以推测, 下地壳主压应力等值线分布状态主要反映了深部构造背景的特征。

地壳各层最大主压应力方向受重力影响明显。计算结果表明, 在模型中不考虑重力影响时, 上、中、下地壳最大主压应力轴均近于水平。当模型中考虑重力影响时, 上地壳最大主压应力轴与水平面构成的倾角平均为 5° , 即近于水平, 其方向大都为 NE 至 NEE。中、下地壳最大主压应力轴倾角平均分别为 58° 和 85° 。由此可见, 在上地壳内水平应力的作用较为明显, 而在下地壳内垂直应力的作用表现较为突出。中地壳的最大主压应力轴表现为由水平向垂直方向过渡的特征。

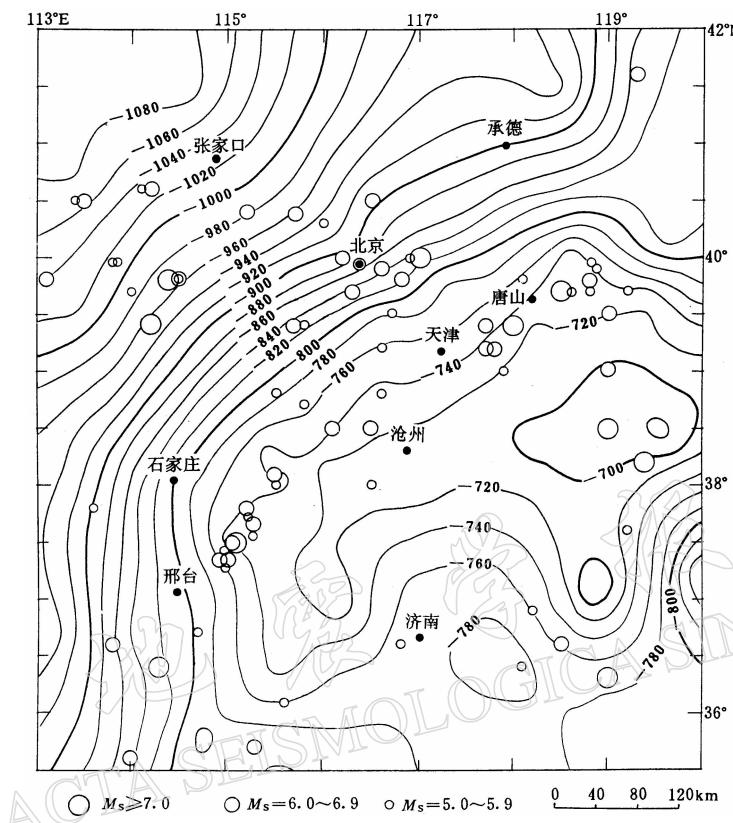


图 5 华北北部下地壳最大主压应力等值线图(应力单位: MPa)

4 讨论

(1) 利用华北北部深部地球物理资料的综合分析解释, 为三维有限单元数值模拟应力场提供了实测的弹性力学参数, 得到了上、中、下地壳应力等值线图. 由最大主压应力等值线图得到, 上地壳主压应力场与浅部地质构造形态的关系十分密切; 下地壳主压应力场与区域地质构造、莫霍面的构造形态更为密切; 中地壳是这两者间的过渡, 从形态上看, 受下地壳、莫霍面构造影响更大.

(2) 华北裂谷盆地内上、中地壳, 特别是上地壳主压应力等值线分布, 与该区中强地震活动的空间分布关系十分密切, 地震主要发生在应力场变化较大区域, 其位置一般位于低应力区(或低应力圈闭周边)向高应力区过渡又偏高应力区的一侧. 局部区域的相对高应力区一般与较坚固的隆起构造对应, 相对低应力区一般也与新生代沉积坳陷区相对应. 梅世蓉(1995)提出, 强震震源都分布在高速块体内, 或高速块体与低速块体接触地带, 但偏于高速体一侧. 通过硬、软包体力学模型研究, 确认硬包体(即坚固体)是大量应变能力集中的重要条件, 只有震源体的刚度大于环境刚度时才可能导致岩体失稳、突然破裂与应力降的产生. 这与本文上述的结论是一致的.

(3) 研究区下地壳主压应力等值线图中可以明显地看出邢台、河间、唐山等中强地震大都分布在北东向主压应力梯级带与华北裂谷盆地低应力区的过渡带上. 王椿墉等(1994)

关于邢台地震区深反射探测结果,以及陆涵行等(1988)关于唐山震区深反射剖面的分析,都认为邢台和唐山地震区存在NNE或NE向深部高角度超壳深断裂。这是否可以说明,研究区下地壳主压应力场突出了深部构造的影响,与中强地震的孕震发生过程有着密切的相关性。

本研究是初次在华北地区利用大规模的实测资料结果进行弹模参数和应力场的计算。在模型设计、边界约束、外力的施加上一定会有一些不足和考虑不周的地方。其结果的解释也主要是利用了最大主压应力场,还有大量的图件,数据均未作深入分析,这些都有待我们下一步继续研究。

本课题所采用的三维线弹有限单元程序由国家地震局地质研究所数值模拟组提供;研究工作得到了宋惠珍、刘洁同志的热情协助;杨健、潘菊敏、朱秀华、孙桂香、杨清等同志参加了程序调试、绘图和文字打印等项工作,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 邓起东,范福田,1980. 华北断块区新生代、现代地质构造特征,华北断块区的形成与演化。北京:科学出版社。192~205
- 河北省地震局,1986. 一九六六年邢台地震。北京:地震出版社。82~96
- 嘉世旭,刘昌铨,1995. 华北地区人工地震测深震相与地壳结构研究。地震地质,17(2): 97~105
- 嘉世旭,刘昌铨,1996. 邢台震源区波速比异常与地震的关系。地球物理学报,39(增刊): 205~215
- 李钦祖,1981. 华北地区的应力场及其与地震活动的关系。西北地震学报,3(1): 101~111
- 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,18(4): 341~353
- 刘昌铨,嘉世旭,李长法,等,1997a. 1966年邢台6.8级地震的深部结构背景。华北地震科学,15(2): 17~24
- 刘昌铨,嘉世旭,刘明军,等,1997b. 延庆-怀来盆地大震危险性分析研究。地震学报,19(5): 517~523
- 刘昌铨,方盛明,李长法,1996. 应县-淄博剖面重力、地震测深联合解释。地震地质,18(4): 369~374
- 陆涵行,曾融生,郭建明,等,1988. 唐山震区深反射剖面分析。地球物理学报,31(1): 27~36
- 马杏垣,刘昌铨,刘国栋,1991a. 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面。地质学报,65(3): 199~215
- 马杏垣,刘昌铨,刘国栋,1991b. 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面说明书。北京:地质出版社。56~57
- 马杏垣(主编),1989. 中国岩石圈动力学地图集。北京:地震出版社。30
- 梅世蓉,1995. 地震前兆物理模式与前兆时空分布机制研究(一)——坚固体孕震模式的由来与证据。地震学报,17(3): 273~282
- 宋惠珍,黄立人,华祥文,1989. 地应力场综合研究。北京:石油工业出版社。53~59
- 万素凡,桂昆长,1992. 华北平原伸展裂陷区的正断层作用与垂直形变。大地形变测量,8(2): 11~18
- 汪素云,陈培善,1980. 中国及邻区现代构造应力场的数值模拟。地球物理学报,23(1): 35~45
- 王椿镛,张先康,吴庆举,等,1994. 华北盆地滑脱构造的地震学证据。地球物理学报,37(5): 613~620
- 徐杰,洪汉净,赵国泽,1985. 华北平原新生代裂谷盆地的演化及运动学特征。现代地壳运动研究——1. 北京:地震出版社。26~40
- 鄢家全,时振梁,汪素云,等,1979. 中国及邻区现代构造应力场的区域特征。地震学报,1(1): 9~24
- 张连甲,黄立人,1989. 怀来延庆地区的水平形变。地震地质,11(2): 79~84