

山西地堑系现今构造应力场^{*}

安美建¹⁾ 李方全²⁾

1) 中国北京 100039 中国科学院中国科技大学研究生院(北京)

2) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

摘要 利用综合震源机制解和原地应力测量资料,对山西地区的构造应力场进行了概括分析,认为该地区与其东部的华北地区具有明显差异的应力状态.其次,通过拟合观测资料,对影响该地区构造应力场分布的边界力作用等进行了反演研究.反演计算结果显示,边界力作用是影响山西地区现今构造应力场的主要因素,区域内部的材料及其性质是影响构造应力场分布的次要因素.山西地区构造应力场水平最大主应力与断陷盆地展布具有一致性.

关键词 山西地堑系 现今构造应力场 震源机制解 原地应力测量 遗传有限单元反演

引言

前些年,国内外学者对山西地堑系进行了重点研究.首先,利用地震地质、地球物理和地震观测等手段,对山西地区复杂的活动构造和地震应力场有了较详细的了解(许忠淮等,1983;薛宏运,鄢家全,1984;李方全,1992;刘巍等,1993;马宗晋,1994);其次,由于工程需要,近年来在山西地区也进行了较多的原地应力测量.这一切观测和研究不但给我们提供了对该地区较全面的认识,而且也为我们对该地区进行深入的地球动力学分析,提供了详细的观测资料.

在对构造应力场的数值分析中,有限单元反演是常用到的.其中,遗传有限单元反演法是利用遗传算法的全局搜索进行有限单元反演的一种有效的方法(安美建等,1997,1998),它能够进行有限单元模型边界力的反演,也能够同时对模型材料性质等进行反演.

本文首先对山西地区现今构造应力场进行了综合分析,并在此基础上,通过利用遗传有限单元反演法,对山西地区构造应力场观测数据进行了拟合反演运算,以期对山西地区的现今构造应力场和地块间的边界作用有更深入的认识.

1 山西地区的活动构造及现今构造应力场

1.1 活动构造简述

研究区内新生代构造发育,有断陷盆地、断裂和一些新地层褶曲等(张步春等,1989;中国岩石圈动力学地图集编委会,1991).山西地堑系与周围地堑相连总体呈“S”型雁行排列;在断陷盆地两侧或一侧均有山前大断裂存在,即盆地均为断裂控制断陷而成的地堑、

* 1997-11-28 收到初稿,1998-05-11 收到修改稿,1998-05-28 决定采用.

半地堑盆地；地堑一般形成于中新世—上新世。该区新生代构造活动的一个重要特点是老断裂新活动和新断裂的形成，这是随着断陷盆地的裂陷发展过程而表现的。根据新生代本区中部盆地带的构造格局及其活动性质进行综合考虑，人们认为本区新生代及其各阶段的断裂、断陷等构造运动，主要是在北东-北东东向挤压、北西-北北西向拉张的区域应力场控制下发生的。

本区的近代活动构造基本上继承了新生代以来的主要活动特征，并以断裂及其控制的断块活动为主，即具有继承性和不均匀性等活动特征。

1.2 现今构造应力场数据

在震源机制解（深度在 50 km 以内）方面，山西地区已有 30 多个 $M_L \geq 4.0$ 地震的地震断层面解结果、15 个地震台站近 20 年的小震综合断面解结果和临汾遥测台网的多台小震综合断面解结果（刘巍等，1993）。图 1 中的细线段表示 $M_L \geq 4.0$ 地震的地震断层面解（共 29 个数据）和小震综合断面解（共 7 个数据）的 P 轴方位，其中山西以东地区的震源机制解主要取自《中国及邻区地震震源机制图》（国家地震局中国地震区划图委员会，1991）。

关于原地应力实测（深度在 1 km 以内），80 年代以来，由于引黄入晋工程的需要，对山西地区进行了十几次原地应力测量，特别是近年来多次用水压致裂法进行了数百米深的测量（Li *et al.*，1983；李方全，1992）^①。图 1 中的粗线段为原地应力测量测得的水平最大

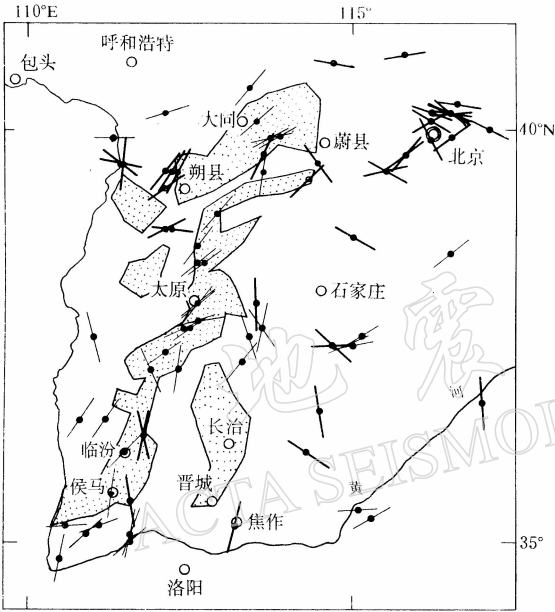


图 1 山西及以东地区现今构造应力场分布。
图中阴影填充的多边形表示断陷盆地[据张步春等(1989)，
盆地边界简化]；细线段表示地震应力场的 P 轴水平
方位，粗线段表示原地应力实测最大主应力方位

主应力方位。

1.3 对现今构造应力场的认识

由于观测数据数量有限以及我们很难判断每一个观测数据本身存在多大的观测误差，因此，本文不讨论不同测量方法之间或同一种方法所得到应力资料随深度和时间的变化特征及分析的有效性。但实际上在一般情况下，我们在局部地点所得到的数据总体平均趋势有一定的一致性（李方全，1992），从图 1 中的实测数据也可看出这一点。这种一致性在一定程度上表明了不同方法和不同时间所得到数据间存在的相互验证，尤其是在了解构造应

① 其它水压致裂资料取自于：
国家地震局地壳应力研究所—室水压致裂测量组，1992. 黄河万家寨水利枢纽深部地应力测量报告。
国家地震局地壳应力研究所—室水压致裂测量组，1992. 山西万家寨引黄工程地应力测量报告。
国家地震局地壳应力研究所—室水压致裂测量组，1993. 引黄入晋工程总干线深部地应力测量报告。
国家地震局地壳应力研究所—室水压致裂测量组，1993. 引黄入晋工程南干线深部地应力测量报告。
国家地震局地壳应力研究所—室水压致裂测量组，1995. 引黄入晋工程南干线 ZKN 分 944 孔地应力测量报告。

力场中能够相互弥补. 总之, 本文研究的是静态区域构造应力场的平面分布.

一般情况下, 国内地震工作者多强调华北地区构造应力场的统一性和均匀性, 但另一方面也指出其不均匀性的存在. 李钦祖(1980)等认为, 华北块体处于一个一致性良好的统一的地壳应力场作用下, 其最大压应力主轴为北东东-南西西向, 最大张应力主轴为北北西-南南东向, 并且都接近水平. 但是也承认在山西地震带, 其地壳应力场具有一定的复杂性, 不像其它地区表现出的一致性那么好. 许忠淮等(1983)在表明华北主体应力场均匀性的同时, 也强调了其不均匀性的存在, 并认为统一和均匀是相对的, 随着观测和分析的发展, 不均匀和不统一的部分将被逐步揭示出来. 薛宏运和鄢家全(1984)认为, 山西的几个断陷盆地主张应力轴虽然都接近水平, 但主应力轴的方位角、仰角都比华北地区大, 其应力特点根本不同于华北地区.

在以华北局部地区为研究主体的情况下, 综合图 1 原地应力测量和震源机制解资料发现, 山西地堑系的构造应力场与太行山以东的应力场有一定的差异. 太行山以东地区, 最大水平主应力方向为近东西向, 而太行山以西的山西断陷盆地地区最大主应力方向多为北北东和北北西方向, 且局部有较大变化. 这与李方全和刘光勋(1986)的看法一致.

1.4 山西地区的构造应力场与活动构造的关系

从图 1 山西地区的现今应力场观测数据与该地区断陷盆地的分布来看, 水平最大主应力方位与断陷盆地的展布有一定的相关性, 尤其是在断陷盆地内部, 水平最大主应力方位与断陷盆地的长轴近于平行. 该地区断陷盆地多形成于中新世—上新世, 并且该区构造活动具有继承性, 这可能是该区现今构造应力场与构造盆地分布一致性的原因.

2 山西地区现今构造应力场的拟合反演

为对山西地区构造应力场进行深入分析, 利用遗传有限单元反演法对该地区的构造应力场进行了拟合反演运算. 由于山西地区现今构造活动主要受水平构造力控制(中国岩石圈动力学地图集编委会, 1991; 汪一鹏, 1994), 因此, 在运算中选了二维平面应力模型.

2.1 遗传有限单元反演的模型和参量选择

反演研究区域以山西省为主体, 北至呼包断陷盆地和大同一蔚县断陷带北缘, 东侧以太行山断裂为界, 南至临汾断陷盆地南缘, 西以 110° 经线为界. 图 1 中位于研究区内的 16 个原地应力测量数据和 36 个震源机制解数据作为构造应力场观测数据.

在研究区内, 划分了 221 个四边形单元, 共 252 个节点(见图 2). 根据研究区的大地构造性质, 把研究区内分成两种材料性质: 断陷盆地为材料 2, 其余为材料 1(见图 2). 材料 1 的泊松比为 0.25, 杨氏模量为 1.1×10^{11} Pa(Dziewonski, Anderson, 1981). 在弹塑性材料模型中利用 Mohr-Coulomb 屈服准则(Owen, Hinton, 1980), 内摩擦角 36° .

根据山西及其周围地区的大地构造情况, 把西边界(ag)定为东西向约束边界, 该边界的中间节点为固定点. 其它 6 段边界 $ab \cdots fg$ 为边界力边界. 反演中假定每段边界的边界应力相同. 每个应力边界反演的三参量分别为最大主应力、最小主应力与最大主应力的比值和最大主应力方位角. 所有应力边界的 3 个反演参量初始搜索区间是一样的, 它们依次为 $0.0 \sim 100.0$ 、 $0.0 \sim 1.0$ 和 $-90.0^{\circ} \sim 90.0^{\circ}$.

在进行遗传算法优选的过程中, 我们以主应力方向观测值与计算值的均方差做为优选的目标函数 D_d . 在计算过程中, 我们利用了动态遗传算法(安美建, 石耀霖, 1996), 并且

选了如下遗传算法的参数值：种群大小 16；固定变异概率 0.02；固定交换概率 0.90. 每个参量的二进制码的长度 15，即每个参量的精度为 $0.000\ 03\Delta$ ， Δ 为单个参量区间长度.

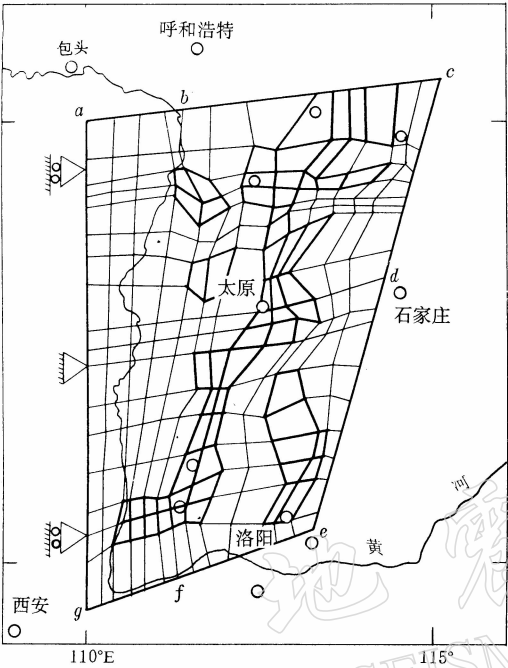


图 2 有限单元模型分布图.
图中粗线单元为材料 2，其它单元为材料 1

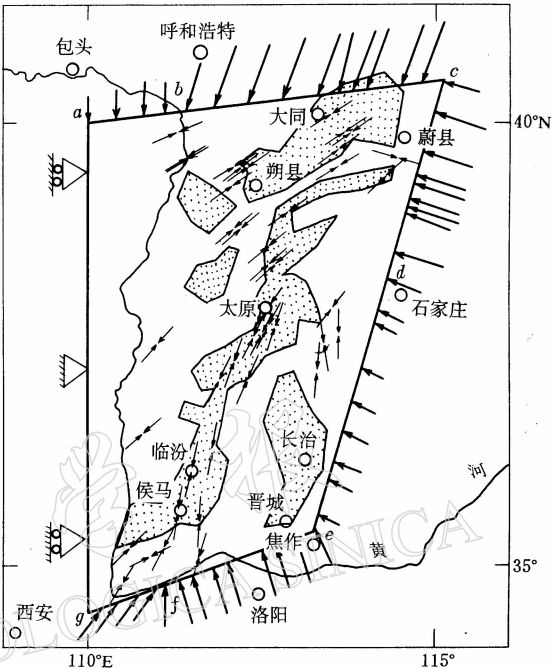


图 3 优化模型的边界力和计算最大主应力分布图.
箭头指向表示边界力的方向，箭头长度与边界力
绝对值开方成正比。线段表示计算主应力方位

2.2 遗传有限单元反演的运算及结果

首先，利用线弹性材料模型对边界力进行反演. 假定材料 2 与材料 1 相同. 在反演中取初始迭代循环次数 $N=5$ ，每次循环的迭代次数 $I_{\max}=50$ ，优化一次搜索区间. 在优化搜索区间时，对新区间不加限制，即假定模型为不知限区间(安美建，石耀霖，1996). 找到理想区间后的最后搜索循环中迭代 $I_{\text{last}, \max}=100$ ，并得到最终优化模型. 计算得到角度拟合均方差 $D_d=31.5^\circ$ 的优化解. 根据粗算搜索的优化区间和优化结果，缩小了初始搜索区间并进行精算. 在精算中， $N=3$ ； $I_{\max}=40$ ；优化一次搜索区间，假定模型为不知限区间； $I_{\text{last}, \max}=100$. 计算得到优化模型拟合均方差 $D_d=31.1^\circ$ ，拟合残差平均值为 24° . 根据精算搜索得到的主应力值计算的边界力矢量分布，见图 3.

根据图 3 中的主应力分布，可以清楚地看出，山西地区计算的现今应力场与该地区的断陷盆地等构造分布有密切的关系，即水平最大主应力方向与断陷盆地长轴展布平行. 从边界力值相对分布来看，计算的边界力与根据地震地质资料所得到的该区受北东-北东东向挤压控制(中国岩石圈动力学地图集编委会，1991)的结论是一致的.

其次，我们在反演边界力的同时，还进行了对材料 2 的泊松比和杨氏模量的反演，反演得到材料 2 比材料 1 更容易变形. 在反演中，对不同大地构造单元等采用相适应的材料性质，有利于模型的拟合. 但从拟合反演的效果来看，区域内部的材料性质是影响构造应力场分布的次要因素.

另外, 我们利用弹塑性模型对模型参数进行了反演, 但得到的结果与线弹性反演的结果几乎一致.

总之, 从平面应力模型反演结果来看, 边界力作用是影响山西地区现今构造应力场的主要因素, 区域内部的材料及其性质是影响构造应力场分布的次要因素.

3 结语

通过对山西地区构造应力场的分析, 我们认为, 山西地区构造应力场与其东部地区有明显的差异, 且其分布与断陷盆地有一定的相关性.

利用拟合反演, 我们认识到块体间的边界力作用是决定山西地区现今构造应力场的主要因素, 并且计算应力场清楚地体现了山西地区构造应力场与断陷盆地展布明显的一致性. 由于山西地区现今应力场观测数据与该地区的断陷盆地分布等有较密切的关系, 因此我们认为, 地块间的相互边界力作用也是影响活动大地构造单元分布的重要因素.

在对山西地区的边界力作用和构造应力场分布的认识基础上, 进一步对整个华北地区进行数值研究, 将是深入了解本地区构造应力场的复杂性及其地球动力学机制, 从而对该地区实现较可靠地震预测的有效途径.

参 考 文 献

- 安美建, 石耀霖, 1996. 动态遗传算法及在 P 波初动震源机制解中的应用. 中国地震, 12(4): 394~402
- 安美建, 石耀霖, 李方全, 1997. 遗传有限单元反演法对理想模型反演的初步研究. 见: 赵国光(主编), 地壳构造和地壳应力文集(十). 北京: 地震出版社. 164~171
- 安美建, 石耀霖, 李方全, 1998. 用遗传有限单元反演法对影响东亚部分地区现今构造应力场边界力作用的反演研究. 地震学报, 20(3): 225~231
- 丁国瑜, 卢演传, 1989. 板内块体的现代运动. 中国岩石圈动力学图集. 北京: 中国地图出版社. 21
- 国家地震局中国地震区划图委员会, 1991. 中国及邻区地震震源机制图及说明书. 北京: 地震出版社. 7~17
- 李方全, 刘光勋, 1986. 我国现今地应力状态及有关问题. 地震学报, 8(2): 156~171
- 李方全, 翟青山, 毕尚熙, 等, 1986. 水压致裂法原地应力测量及初步结果. 地震学报, 8(4): 431~438
- 李方全, 1992. 套芯法、水压致裂法原地应力测量、钻孔崩落及震源机制解分析所得结果的对比. 地震学报, 14(2): 149~155
- 李钦祖, 1980. 华北地壳应力场的基本特征. 地球物理学报, 23(4): 377~387
- 刘巍, 赵新平, 安卫平, 等, 1993. 山西地区的地壳应力场. 山西地震, (3): 4~11
- 马宗晋(主编), 1994. 山西临汾地震研究与系统减灾. 北京: 地震出版社. 1~11
- 汪一鹏, 1994. 鄂尔多斯地区的活动断裂与岩石圈动力学. 见: 国家地震局地质研究所(编), 现今地球动力学研究及其应用. 北京: 地震出版社. 222~227
- 许忠淮, 阎明, 赵仲和, 1983. 由多个小震推断的华北地区构造应力场的方向. 地震学报, 5(3): 268~279
- 薛宏运, 鄢家全, 1984. 鄂尔多斯地块周围的现代地壳应力场. 地球物理学报, 27(2): 144~151
- 张步春, 喻克智, 贾三发, 1989. 山西地震构造. 中国岩石圈动力学图集. 北京: 中国地图出版社. 31
- 中国岩石圈动力学地图集编委会, 1991. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社. 279~288
- Dziewonski A M, Anderson D L, 1981. Preliminary reference earth model. *Phys Earth Planet Int*, 25: 297~356
- Li F Q, Li Y M, Wang E F, *et al*, 1983. Experiments of in situ stress measurements using stress relief and hydraulic fracturing techniques. In: Zoback M D, Haimson B C(eds), *Hydraulic Fracturing Stress Measurements*. Washington, D C: National Academy Press. 130~134
- Owen D R J, Hinton E, 1980. *Finite Elements in Plasticity — Theory and Practice*. New York: Pineridge Press Ltd. 157~269