

# 用遗传算法反演京津唐张地区的 三维地壳结构和震源位置<sup>\*</sup>

万永革<sup>1)</sup> 刘瑞丰<sup>2)</sup> 李鸿吉<sup>2)</sup>

1) 中国北京东燕郊 101601 防灾技术高等专科学校

2) 中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所

**摘要** 介绍了遗传算法反演京津唐张地区速度结构和震源位置的方法。运用华北遥测地震台网收集到的地方震到时数据, 反演得到所选地震的震源位置和该地区的地壳结构。得到的震源位置的平均残差和标准残差大大小于地震报告给出震源位置的平均残差和标准残差; 得到的第1层和第2层地壳结构较好地解释了该地区的平原山区的构造轮廓, 第3层地壳结构与前人反演及人工测深得到的 Moho 界面起伏大体一致。表明遗传算法反演地震震源位置和速度结构是很有效的。

**主题词** 地壳结构 非线性 反演 遗传算法 震源位置

## 引言

地壳结构及性质与地震的孕育和发展过程及其空间分布特征有密切的关系, 并且是研究油气、矿产资源的基础。它对于研究不同时期和不同构造单元的地壳、地幔形成和演化过程有着重要的意义, 并且是解释地质、地球物理现象和地震预报前兆现象的依据。而精确地壳速度结构的反演是建立在精确震源位置的基础上的。反演中所用的地震震相的到时数据中既包含震源位置的信息又包含地震波传播路径上的速度结构的信息。因此, 只有利用地震震相到时数据速度结构和震源位置才可以避免引入不确定因素。Crosson(1976)假定了一个水平分层结构的地壳模型, 发展了一种确定层速度和震源参数的方法。Aki 和 Lee (1976)将所研究地区的介质分割成具有常数速度的矩形块体, 成功地从观测到的地方震到时数据中提取出三维速度异常的信息。这些方法都要求解大型线性代数方程组, 需要大量的计算机内存和机时。Pavlis 和 Booker(1980)以及 Spencer 和 Gubbins(1980)改进了上述方法, 将耦合着的速度和震源参数分别求解, 从而大大减少了内存。刘福田(1984)在上述联合反演问题中引入了正交投影算子, 将震源参数和速度参数分离, 大大提高了联合反演的实用性。但这些反演方法通常是利用小扰动理论把非线性的反演问题线性化, 然后通过求解线性代数方程组来实现。为了用非线性的方法求解反演问题, Ashya 等(1987)采用切比雪夫函数来描述界面的深度分布或三维速度分布, 使速度结构参数大大减少, 他们采用了非线性反演方法, 成功地反演了日本关东-东海地区下部三维速度结构和震源位置。但用

\* 1996-10-11 收到初稿, 1997-04-01 收到修改稿并决定采用。

非线性的方法求解自由度较大的反演问题的研究相对较少。

遗传算法是一种比较快速高效的非线性优化算法，在解非线性地球物理反演问题方面有其独特的优势。它主要特点是全局搜索、不需要求导数、不依赖于初始模型的选取而又普遍适用于各种优化问题。遗传算法在地球物理领域中的应用始于1990年。Stoffa和Sen(1991, 1992)将该方法应用于平面波波形反演，由地震反射数据得到了合理的岩石层的速度和密度结构；Sambridge和Drikkonen(1992)描述了多参数二次式的优化问题中遗传算法优于Monte Carlo方法的各方面特征，并将该方法用于地震反射波形反演速度剖面问题；Sambridge和Gallagher(1993)将遗传算法用于震源位置的测定问题中，显示了该算法是搜索模型空间、找到最优模型的强有力的工具；Nolte和Frazer(1994)将遗传算法用于垂直地震剖面(VSP)反演，得到了合理的慢度和阻抗剖面；Zhou等(1995)运用遗传算法和远震宽频带地震体波波形资料，反演了震源周围的速度结构且表现出该算法的较强的抗干扰特性；King(1995)运用遗传算法反演了粘滞性地幔的径向模型，找到了另外一组常规方法不能得到的与观测资料符合的模型。我国在90年代初开始将这一方法引进地球物理学研究领域(石耀霖，1992)。陶春辉等(1994)在遗传算法中引入灾变概念和通过多个目标函数的综合评价对算法进行改进，并用它对层状弹性介质的纵横波速度和密度进行了联合反演，效果良好且表现出较强的抗干扰特性。石耀霖等(1995)将遗传算法用于面波频散反演问题，得到了满意的效果，并提出了对初步搜索结果的参数分布进行分析，从而修改和缩小进一步搜索的范围，逐步搜索以提高搜索效果的方法。总之，遗传算法在各个领域都表现出较强的适用性和高效性。但到目前为止，还没有见到用遗传算法求解较多参数的反演问题的文章发表。本文试用遗传算法反演京津唐张地区的三维速度结构和所用地震的震源位置。

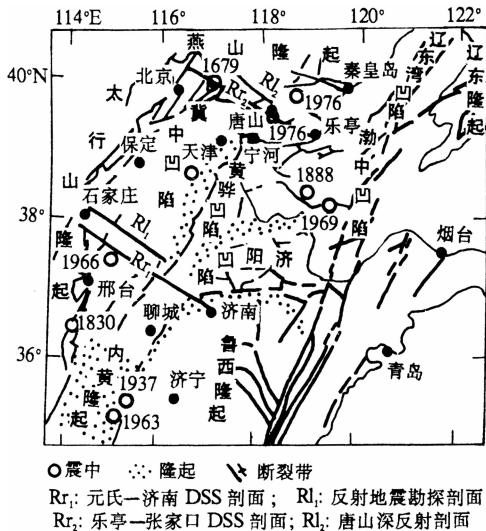


图1 华北地区地质构造简图(曾融生等, 1991)

的“华北遥测地震台网联网系统”，已经积累了大量的地震记录，为研究工作提供了良好的条件。另外，我国的地震工作者已在该区做了大量艰苦的观测和研究工作，取得了很多地球物理成果。特别是人工爆破地震测深得到的速度剖面和天然地震得到的三维速度结构，

京津唐张地区位于华北盆地的北部，自新生代起，该区经受过几次张裂、不均匀沉降和区域性下沉。由于沉降的幅度不均匀，该区形成了众多的凹陷和隆起，如北部和西部的燕山隆起和太行山隆起，往西南方向还有冀中凹陷、沧县隆起、黄骅凹陷、埕宁隆起等(图1)。这些凹陷和隆起分别被断层所切割。断层的走向多数为北北东-南南西向。总之，该地区的地质构造十分复杂。京津唐张地区是华北地震区活动频繁的区域，历史上曾发生多次强烈地震。深入研究该地区的地震震源位置和三维地壳速度结构，无论是对于提高区域台网的定位精度、判定区域地震的震源机制、研究板内地震的构造背景以及地震预报研究等都具有重要的科学意义。该区拥有世界银行贷款和国家大量投资建成

这使我们可以将独立得到的结果加以比较，以增强结果的可信度。

## 1 方法

### 1.1 遗传算法基本理论

假定  $m$  个未知参数的模型向量空间为  $\{x_i\}$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ . 根据先验知识, 对每一未知量都加一上下界为  $a_i$  及  $b_i$  的限制, 即为了将问题的解表示为整数, 我们将连续的参数空间离散化, 根据各参数的精度不同, 将每个参数划分为  $2^{n_i}$  等份, 于是所有的解空间可用下式表示:

$$x_i = a_i + I_i d_i \quad (I_i = 0, 1, 2, \dots, 2^{n_i}, i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

因此, 解空间  $\{I_i\}$  等价于  $\{x_i\}$ . 这样, 就把参数空间映射为整数解空间. 为了便于计算机处理, 我们把这一组整数编成一个二进制码, 即将每一整数变为二进制数然后再连起来. 这就形成了一个模型参数的标准基因编码.

首先在搜索范围内随机产生  $Q$  组解, 将每一组解按上述编码规则编成二进制码(染色体)就构成了输入种群, 对每一组解计算其目标函数(拟合差), 计算公式如下:

$$\varphi = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (obs_{ij} - theo_{ij})^2 \quad (2)$$

遗传算法的繁殖过程是以生存系数为依据的, 拟合差越小的个体越接近于最优模型, 其生存概率越大, 生存系数由下式求得:

$$f_i = \varphi_{\max} - \varphi_i \quad i = 1, 2, \dots, Q \quad (3)$$

由上式可以看出, 拟合差最大的个体生存概率为 0, 即抛弃了拟合差最大的个体. 根据生存系数的大小, 采用轮盘赌的概率选择方法, 选择  $Q$  个个体组成新的种群, 这就完成了繁殖过程.

交配过程是将  $Q$  个染色体随机配成  $Q/2$  对“父母”, 以交配概率  $p_c$  来确定这对“父母”能否交配. 进行交配的“父母”(染色体对)交换对应的基因, 产生一对新个体. 对  $Q/2$  对染色体操作完毕后就完成了交配过程.

变异是生物进化中产生新种属的重要步骤, 即遗传基因(二进制码)不完全来源于“父母”, 而随偶然因素或环境发生少量的改变, 变异后产生的新个体组成的种群又作为下一次繁殖的“父母本”, 这样重复上述 3 个过程, 实现模型的全局优化.

### 1.2 遗传算法求震源位置和速度结构的反演问题

运用遗传算法求解反演问题的关键是拟合差的表述形式. 有了拟合差的计算公式, 我们就可以选择一种染色体的编码方式和生存概率的计算方式进行繁殖、交配和变异, 反复迭代, 直到得到满意的拟合差为止.

我们假定震源为点源. 已知  $m$  个台站观测到的  $n$  次地震的 P 波初动到时, 要确定震源参数和台站下的 P 波速度结构. 在第  $k$  个台站上观测到第  $j$  次地震的 P 波初动走时表示为沿射线路径  $\Gamma_j$  的  $\tau_{jk}$ . 由于有  $n$  次地震, 待测定的震源位置参数的个数为  $3n$  个, 用  $(x_j^0, y_j^0, z_j^0)$  表示第  $j$  次地震的震源位置坐标,  $j=1, 2, \dots, n$ . 设所研究的区域可划分为  $L$  个矩形块体, 其各边平行于笛卡尔坐标系中的  $x, y, z$  轴, 用  $v$  表征每个块体的 P 波速度. 若  $i$  是块体的序号, 则第  $i$  块的速度为  $v_i$  ( $v_i=1, 2, \dots, L$ ). 假设速度模型的每个块体至少有一条射线路径穿过, 那么, 反演问题的待定参数总数为  $(3n+L)$ . 解的参数矢量可表示为

$$r_{jk}(\xi^*) = (x_1^*, y_1^*, z_1^*, x_2^*, y_2^*, z_2^*, \dots, x_n^*, y_n^*, z_n^*, v_1^*, v_2^*, \dots, v_L^*)$$

三维不均匀介质中理论走时的计算按下述思路进行：首先平滑震源和台站所确定的立方体的各层的慢度值，即将三维不均匀的地壳模型转化为一维地壳模型，按层状介质模型计算射线所经过的路径。由于同一层中地震波慢度的差别不会太大，我们可以近似用层状介质下的射线路径代替三维横向不均匀介质中地震射线的路径。然后，按上述路径计算每一层中每一块体射线所经过的路径长度，块体的慢度乘以块体中的路径长度即得到地震射线在此块体中的走时，把各层中各块体的走时相加即得到该地震射线的走时。

定义第  $j$  次地震在第  $k$  个台站的走时残差为

$$r_{jk}(\xi^*) = \tau_{jk} - T_{jk}(\xi^*) \quad (4)$$

这里， $\tau_{jk}$  是在第  $k$  个台站上观测的第  $j$  次地震的 P 波初动走时， $T_{jk}(\xi^*)$  为第  $j$  次地震的尝试震源  $(x_j^*, y_j^*, z_j^*)$  的相应理论走时。现在的目标是同时调节尝试震源和速度的参数，使走时残差的平方和，即

$$Fitmis(\xi^*) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m [r_{jk}(\xi^*)]^2 \quad (5)$$

减到最小。这就是震源位置和速度结构的反演问题，有了拟合差的表述式，我们不难将遗传算法用于此反演问题中。

## 2 数据及处理过程

### 2.1 数据

我们所用的全部数据均取自国家地震局地球物理研究所四室编的《华北遥测地震台网联网地震观测报告》。由于数字化资料易于辨认震相且能得到更为可靠的震相到时，我们所用的部分数据采用数字地震记录回放软件将数字化资料在计算机屏幕上显示放大，校正了地震报告的观测数据。由于华北地震遥测台网中只有少数台站作了模数转换，数字记录是很不完整的。我们只将所能得到的数字记录对我们所用的地震震相到时作了校正。由于华北遥测地震台网联网系统自 1992 年 9 月正式承担日常监测任务，截止到 1995 年底，仅积累了 3 年零 3 个月的地震数据。选取地震时注意到：① 每个地震至少有 15 个台的震相到时数据；② 考虑到下部地壳反演的准确度，每个地震至少有 3 个以上的莫霍界面绕射波 Pn 到时数据。结果筛选出 102 个地震共 2 340 个震相的到时数据。其中有 1 712 个直达波到时数据，有 628 个莫霍界面绕射波 Pn 的到时数据。平均每个地震约有 23 个到时数据，台站高程已校正。图 2 和表 1 给出了所用地震的震源位置，其中有很多地震在《华北遥测地震台网联网地震观测报告》中没有给出震源深度（表 1）。

### 2.2 网格划分

众所周知，京津唐张地区的断层以及凹陷和隆起的走向多数为北北东-南南西向（图 1）。考虑到此地质构造背景，我们划分块体时，网格走向相对于经纬线右旋了  $45^\circ$ ，以便与本地区的构造线一致。考虑到研究区域内台站的分布和震中的分布，网格的划分应尽量让每一块体均有足够的射线通过。网格的划分是不规则的，中间较稠密，边缘较稀疏（图 2），每层共划分了  $6 \times 6 = 36$  块。考虑到滕吉文等（1979）采用人工爆破资料和海城地震余震资料得到的京津唐张地区综合地壳模型较为精确，我们按此模型将地壳分为 3 层：第 1 层厚度为 5.31 km；第 2 层为人们通常认为的花岗层，厚度为 14.42 km；第 3 层为人们所通常

认为的玄武岩层,厚度为16.67 km。这样,整个研究区域地壳被划分为: $36 \times 3 = 108$ 块。平均每块所用的震相到时数据约为21.7个。

表1 地震观测报告所给出的震源位置与反演得到的震源位置的比较

| No. | 观测报告给出的震源位置         |                     |           |            |            | 反演得到的震源位置           |                     |           |            |            | 震中差距<br>/km |
|-----|---------------------|---------------------|-----------|------------|------------|---------------------|---------------------|-----------|------------|------------|-------------|
|     | $\varphi_N$<br>/(°) | $\lambda_E$<br>/(°) | 深度<br>/km | 平均残差<br>/s | 标准残差<br>/s | $\varphi_N$<br>/(°) | $\lambda_E$<br>/(°) | 深度<br>/km | 平均残差<br>/s | 标准残差<br>/s |             |
| 1   | 39.130              | 117.800             | 无         | 1.440      | 0.950      | 39.294              | 117.889             | 6.12      | 0.642      | 0.891      | 11.215      |
| 2   | 38.950              | 113.067             | 无         | 1.976      | 1.183      | 38.968              | 113.008             | 5.43      | 0.957      | 0.626      | 5.480       |
| 3   | 39.750              | 118.300             | 5         | 7.593      | 6.223      | 39.760              | 118.374             | 8.20      | 0.931      | 0.834      | 6.423       |
| 4   | 42.783              | 116.133             | 无         | 1.467      | 0.649      | 42.860              | 116.220             | 9.41      | 0.487      | 0.412      | 11.120      |
| 5   | 39.700              | 118.283             | 无         | 1.407      | 0.972      | 39.732              | 118.380             | 5.43      | 0.689      | 0.478      | 9.028       |
| 6   | 39.700              | 118.267             | 3         | 5.798      | 4.512      | 39.684              | 118.315             | 6.29      | 0.356      | 0.219      | 4.476       |
| 7   | 39.833              | 113.850             | 5         | 6.866      | 4.791      | 39.806              | 113.824             | 5.43      | 0.563      | 0.367      | 8.845       |
| 8   | 39.233              | 117.167             | 7         | 1.134      | 0.659      | 39.212              | 117.209             | 10.45     | 0.755      | 0.667      | 4.306       |
| 9   | 38.250              | 119.250             | 无         | 2.216      | 1.042      | 38.265              | 119.374             | 5.43      | 1.025      | 0.960      | 10.955      |
| 10  | 39.583              | 114.867             | 5         | 5.219      | 3.358      | 39.593              | 114.865             | 8.89      | 0.787      | 0.513      | 1.125       |
| 11  | 39.817              | 118.367             | 无         | 1.109      | 0.853      | 39.830              | 118.434             | 6.81      | 0.747      | 0.450      | 5.902       |
| 12  | 39.850              | 113.900             | 8         | 1.280      | 0.925      | 39.849              | 113.854             | 5.43      | 0.670      | 0.642      | 3.929       |
| 13  | 39.667              | 118.250             | 无         | 1.097      | 0.594      | 39.634              | 118.318             | 7.85      | 0.429      | 0.330      | 6.882       |
| 14  | 40.033              | 116.583             | 5         | 5.002      | 3.577      | 40.073              | 116.643             | 5.43      | 0.645      | 0.693      | 6.772       |
| 15  | 39.583              | 118.417             | 6         | 1.176      | 0.856      | 39.533              | 118.472             | 10.28     | 0.499      | 0.319      | 7.290       |
| 16  | 39.117              | 113.400             | 无         | 1.401      | 0.776      | 39.107              | 113.307             | 5.43      | 0.738      | 0.641      | 8.101       |
| 17  | 39.333              | 117.700             | 11        | 0.850      | 0.495      | 39.321              | 117.766             | 7.85      | 0.443      | 0.344      | 5.832       |
| 18  | 40.483              | 113.867             | 无         | 1.628      | 0.989      | 40.450              | 113.783             | 5.77      | 1.040      | 0.598      | 7.998       |
| 19  | 39.467              | 117.950             | 5         | 6.754      | 5.498      | 39.443              | 118.028             | 8.20      | 0.651      | 0.716      | 7.209       |
| 20  | 37.717              | 119.550             | 无         | 3.231      | 1.836      | 37.807              | 119.659             | 19.63     | 1.228      | 0.558      | 13.855      |
| 21  | 39.883              | 117.117             | 5         | 5.132      | 5.306      | 39.877              | 117.172             | 8.89      | 0.713      | 0.433      | 4.741       |
| 22  | 39.717              | 118.583             | 5         | 7.819      | 6.304      | 39.805              | 118.653             | 5.43      | 0.894      | 0.613      | 11.470      |
| 23  | 39.600              | 118.217             | 无         | 1.411      | 1.418      | 39.689              | 118.409             | 6.64      | 0.978      | 0.743      | 19.189      |
| 24  | 39.683              | 118.233             | 无         | 1.184      | 1.102      | 39.720              | 118.329             | 5.43      | 0.564      | 0.501      | 9.186       |
| 25  | 39.467              | 114.233             | 无         | 0.704      | 0.665      | 39.483              | 114.2361            | 0.62      | 0.610      | 0.353      | 1.798       |
| 26  | 39.950              | 116.650             | 5         | 4.638      | 4.033      | 39.962              | 116.627             | 10.28     | 0.752      | 0.632      | 2.372       |
| 27  | 39.883              | 113.883             | 10        | 1.762      | 1.171      | 39.896              | 113.733             | 5.43      | 0.719      | 0.421      | 12.880      |
| 28  | 39.883              | 113.883             | 13        | 1.213      | 1.047      | 39.890              | 113.803             | 5.43      | 0.575      | 0.386      | 6.870       |
| 29  | 39.867              | 113.867             | 5         | 5.712      | 4.220      | 39.850              | 113.802             | 5.77      | 0.595      | 0.469      | 5.861       |
| 30  | 39.383              | 117.950             | 5         | 6.951      | 5.620      | 39.424              | 118.096             | 5.43      | 0.563      | 0.852      | 13.348      |
| 31  | 39.817              | 118.800             | 无         | 0.957      | 0.702      | 39.729              | 118.723             | 6.29      | 0.591      | 0.333      | 11.793      |
| 32  | 39.683              | 118.433             | 5         | 6.282      | 4.818      | 39.635              | 118.476             | 9.58      | 0.517      | 0.474      | 6.484       |
| 33  | 39.667              | 118.200             | 5         | 7.250      | 6.491      | 39.677              | 118.314             | 7.16      | 0.688      | 0.534      | 9.759       |
| 34  | 40.100              | 117.033             | 8         | 0.989      | 0.682      | 40.098              | 117.050             | 5.43      | 0.677      | 0.453      | 1.463       |
| 35  | 40.783              | 112.333             | 无         | 1.425      | 1.026      | 40.678              | 112.164             | 5.43      | 0.600      | 0.489      | 18.415      |
| 36  | 39.600              | 117.450             | 14        | 1.199      | 0.843      | 39.661              | 117.441             | 9.58      | 0.629      | 0.568      | 6.827       |
| 37  | 39.367              | 117.883             | 6         | 1.408      | 0.919      | 39.389              | 117.971             | 6.98      | 0.834      | 0.820      | 7.950       |
| 38  | 39.667              | 114.467             | 7         | 1.241      | 0.856      | 39.712              | 114.430             | 12.01     | 1.010      | 0.606      | 5.922       |
| 39  | 39.767              | 118.367             | 13        | 1.387      | 1.253      | 39.815              | 118.451             | 7.50      | 0.840      | 0.609      | 8.944       |
| 40  | 39.583              | 118.583             | 无         | 0.901      | 0.751      | 39.660              | 118.625             | 8.20      | 0.742      | 0.561      | 9.287       |
| 41  | 39.767              | 118.383             | 无         | 0.817      | 0.587      | 39.745              | 118.435             | 5.43      | 0.354      | 0.273      | 5.074       |
| 42  | 38.850              | 118.933             | 无         | 1.639      | 1.107      | 38.873              | 119.084             | 12.18     | 0.798      | 0.800      | 13.323      |
| 43  | 39.800              | 119.317             | 无         | 1.159      | 0.610      | 39.849              | 119.393             | 7.33      | 0.628      | 0.405      | 8.474       |

续表 1

| No. | 观测报告给出的震源位置                   |                               |           |            |            | 反演得到的震源位置                     |                               |           |            |            | 震中差距<br>/km |
|-----|-------------------------------|-------------------------------|-----------|------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|
|     | $\varphi_N$<br>( $^{\circ}$ ) | $\lambda_E$<br>( $^{\circ}$ ) | 深度<br>/km | 平均残差<br>/s | 标准残差<br>/s | $\varphi_N$<br>( $^{\circ}$ ) | $\lambda_E$<br>( $^{\circ}$ ) | 深度<br>/km | 平均残差<br>/s | 标准残差<br>/s |             |
| 44  | 39.900                        | 113.883                       | 12        | 1.202      | 1.123      | 39.879                        | 113.832                       | 5.77      | 0.709      | 0.484      | 4.939       |
| 45  | 42.717                        | 116.750                       | 无         | 1.122      | 0.994      | 42.758                        | 116.733                       | 11.14     | 0.704      | 0.521      | 4.766       |
| 46  | 37.850                        | 120.400                       | 无         | 2.002      | 1.154      | 37.692                        | 120.389                       | 11.14     | 0.721      | 0.679      | 17.596      |
| 47  | 38.217                        | 118.200                       | 无         | 0.897      | 0.784      | 38.207                        | 118.243                       | 7.33      | 0.689      | 0.587      | 3.918       |
| 48  | 39.733                        | 118.417                       | 8         | 0.812      | 0.498      | 39.706                        | 118.432                       | 8.72      | 0.433      | 0.289      | 3.265       |
| 49  | 39.933                        | 118.733                       | 无         | 1.159      | 0.792      | 39.914                        | 118.815                       | 6.64      | 0.530      | 0.380      | 7.305       |
| 50  | 39.450                        | 118.083                       | 无         | 1.720      | 1.264      | 39.485                        | 118.205                       | 8.98      | 0.876      | 0.617      | 11.173      |
| 51  | 40.717                        | 113.483                       | 无         | 1.635      | 1.424      | 40.782                        | 113.432                       | 5.60      | 0.837      | 0.705      | 8.409       |
| 52  | 39.750                        | 118.417                       | 8         | 0.981      | 0.867      | 39.701                        | 118.381                       | 5.60      | 0.475      | 0.584      | 6.259       |
| 53  | 39.733                        | 118.283                       | 无         | 1.376      | 1.063      | 39.760                        | 118.363                       | 8.20      | 1.329      | 0.838      | 7.470       |
| 54  | 38.150                        | 115.350                       | 无         | 1.021      | 0.759      | 38.108                        | 115.322                       | 6.98      | 0.899      | 0.622      | 4.929       |
| 55  | 37.967                        | 119.900                       | 无         | 2.877      | 1.641      | 38.174                        | 120.058                       | 9.24      | 0.634      | 0.523      | 26.854      |
| 56  | 39.917                        | 113.883                       | 7         | 1.486      | 1.261      | 39.868                        | 113.762                       | 6.98      | 0.802      | 0.718      | 11.673      |
| 57  | 39.917                        | 118.767                       | 5         | 6.504      | 5.499      | 39.884                        | 118.765                       | 5.60      | 0.653      | 0.638      | 3.674       |
| 58  | 39.733                        | 118.433                       | 11        | 0.947      | 0.864      | 39.693                        | 118.367                       | 8.20      | 0.363      | 0.222      | 7.188       |
| 59  | 40.600                        | 114.417                       | 10        | 1.030      | 0.728      | 40.585                        | 114.387                       | 5.60      | 0.882      | 0.502      | 3.033       |
| 60  | 39.800                        | 118.783                       | 无         | 1.307      | 0.758      | 39.761                        | 118.830                       | 5.77      | 0.510      | 0.394      | 5.911       |
| 61  | 39.483                        | 113.017                       | 无         | 1.488      | 1.153      | 39.480                        | 112.958                       | 5.43      | 0.759      | 0.538      | 5.075       |
| 62  | 39.883                        | 114.950                       | 5         | 5.011      | 3.452      | 39.827                        | 114.813                       | 5.77      | 1.363      | 0.877      | 13.249      |
| 63  | 39.633                        | 118.350                       | 无         | 0.814      | 0.954      | 39.702                        | 118.424                       | 7.50      | 0.344      | 0.302      | 9.950       |
| 64  | 39.817                        | 118.717                       | 无         | 1.734      | 1.608      | 39.723                        | 118.603                       | 7.85      | 0.747      | 1.013      | 14.290      |
| 65  | 37.667                        | 118.517                       | 无         | 1.928      | 1.346      | 37.619                        | 118.591                       | 6.29      | 0.945      | 1.018      | 8.423       |
| 66  | 39.800                        | 118.533                       | 6         | 0.804      | 0.575      | 39.769                        | 118.524                       | 6.64      | 0.578      | 0.432      | 3.532       |
| 67  | 42.783                        | 116.183                       | 无         | 2.191      | 0.867      | 42.912                        | 116.300                       | 9.52      | 0.861      | 0.659      | 17.227      |
| 68  | 39.917                        | 118.733                       | 5         | 6.851      | 5.696      | 39.934                        | 118.831                       | 7.16      | 0.592      | 0.446      | 8.568       |
| 69  | 41.583                        | 120.217                       | 无         | 2.540      | 0.842      | 41.660                        | 120.362                       | 5.60      | 0.639      | 0.558      | 14.853      |
| 70  | 39.817                        | 113.783                       | 10        | 0.694      | 0.568      | 39.820                        | 113.782                       | 6.81      | 0.582      | 0.496      | 0.344       |
| 71  | 39.633                        | 118.317                       | 4         | 5.359      | 3.929      | 39.646                        | 118.387                       | 9.76      | 0.545      | 0.361      | 6.166       |
| 72  | 40.883                        | 115.283                       | 无         | 1.367      | 0.882      | 40.950                        | 115.302                       | 10.97     | 1.063      | 0.880      | 7.620       |
| 73  | 39.150                        | 112.933                       | 无         | 1.810      | 1.546      | 39.176                        | 112.995                       | 21.36     | 1.010      | 0.902      | 6.077       |
| 74  | 42.850                        | 115.917                       | 无         | 3.272      | 1.068      | 42.988                        | 116.090                       | 8.89      | 0.451      | 0.292      | 20.831      |
| 75  | 39.350                        | 113.533                       | 8         | 1.950      | 1.198      | 39.317                        | 113.440                       | 5.43      | 0.763      | 0.548      | 8.800       |
| 76  | 39.700                        | 118.333                       | 11        | 0.869      | 0.588      | 39.689                        | 118.315                       | 7.50      | 0.381      | 0.345      | 1.967       |
| 77  | 40.450                        | 114.633                       | 无         | 0.824      | 0.727      | 40.451                        | 114.605                       | 8.37      | 0.720      | 0.560      | 2.372       |
| 78  | 39.767                        | 118.600                       | 无         | 0.940      | 0.595      | 39.750                        | 118.645                       | 8.54      | 0.452      | 0.354      | 4.286       |
| 79  | 39.717                        | 118.283                       | 无         | 1.196      | 0.726      | 39.747                        | 118.353                       | 5.60      | 0.469      | 0.394      | 6.853       |
| 80  | 39.650                        | 118.317                       | 无         | 1.024      | 0.780      | 39.604                        | 118.349                       | 8.37      | 0.394      | 0.239      | 5.803       |
| 81  | 39.883                        | 118.867                       | 无         | 1.105      | 0.728      | 39.931                        | 118.928                       | 7.16      | 0.473      | 0.409      | 7.454       |
| 82  | 39.933                        | 117.183                       | 13        | 1.043      | 0.885      | 39.953                        | 117.190                       | 8.72      | 0.659      | 0.496      | 2.303       |
| 83  | 39.767                        | 118.400                       | 无         | 1.047      | 0.711      | 39.717                        | 118.388                       | 7.16      | 0.340      | 0.232      | 5.654       |
| 84  | 38.233                        | 119.467                       | 无         | 1.205      | 0.718      | 38.215                        | 119.439                       | 6.81      | 0.966      | 0.842      | 3.161       |
| 85  | 39.733                        | 118.450                       | 13        | 0.916      | 0.742      | 39.713                        | 118.427                       | 8.54      | 0.435      | 0.513      | 2.969       |
| 86  | 40.267                        | 115.433                       | 5         | 3.992      | 3.031      | 40.305                        | 115.434                       | 7.68      | 0.499      | 0.442      | 4.227       |
| 87  | 40.233                        | 119.117                       | 无         | 1.186      | 1.364      | 40.192                        | 119.066                       | 5.43      | 0.869      | 1.025      | 6.288       |
| 88  | 42.783                        | 116.117                       | 无         | 1.204      | 0.853      | 42.849                        | 116.206                       | 10.97     | 0.561      | 0.379      | 10.323      |
| 89  | 38.067                        | 115.350                       | 5         | 9.095      | 5.542      | 37.956                        | 115.286                       | 5.43      | 0.831      | 0.649      | 13.557      |

续表 1

| No. | 观测报告给出的震源位置         |                     |           |            |            | 反演得到的震源位置           |                     |           |            |            | 震中差距<br>/km |
|-----|---------------------|---------------------|-----------|------------|------------|---------------------|---------------------|-----------|------------|------------|-------------|
|     | $\varphi_N$<br>/(°) | $\lambda_E$<br>/(°) | 深度<br>/km | 平均残差<br>/s | 标准残差<br>/s | $\varphi_N$<br>/(°) | $\lambda_E$<br>/(°) | 深度<br>/km | 平均残差<br>/s | 标准残差<br>/s |             |
| 90  | 39.750              | 118.450             | 无         | 1.052      | 1.212      | 39.716              | 118.380             | 5.94      | 0.701      | 0.773      | 7.080       |
| 91  | 40.300              | 115.400             | 无         | 0.781      | 0.618      | 40.292              | 115.468             | 13.39     | 0.607      | 0.408      | 5.836       |
| 92  | 40.283              | 115.417             | 无         | 2.359      | 0.817      | 40.385              | 115.529             | 13.74     | 1.347      | 1.080      | 14.791      |
| 93  | 40.400              | 116.100             | 10        | 0.505      | 0.339      | 40.389              | 116.094             | 9.41      | 0.497      | 0.332      | 1.325       |
| 94  | 40.267              | 118.467             | 10        | 0.718      | 0.530      | 40.276              | 118.488             | 6.46      | 0.538      | 0.387      | 2.043       |
| 95  | 39.433              | 112.933             | 无         | 1.750      | 1.136      | 39.444              | 112.872             | 5.43      | 0.732      | 0.594      | 5.379       |
| 96  | 40.300              | 113.283             | 无         | 0.903      | 0.663      | 40.321              | 113.301             | 5.43      | 0.535      | 0.377      | 2.790       |
| 97  | 40.283              | 115.400             | 8         | 0.691      | 0.558      | 40.271              | 115.418             | 13.39     | 0.597      | 0.434      | 2.028       |
| 98  | 39.467              | 115.100             | 13        | 1.289      | 0.936      | 39.390              | 115.165             | 13.05     | 1.041      | 0.559      | 10.222      |
| 99  | 39.750              | 118.617             | 无         | 1.457      | 0.934      | 39.832              | 118.724             | 6.29      | 0.574      | 0.452      | 12.913      |
| 100 | 42.850              | 115.967             | 无         | 2.077      | 1.633      | 42.970              | 116.152             | 6.29      | 0.789      | 1.036      | 20.127      |
| 101 | 42.850              | 115.917             | 无         | 3.374      | 1.159      | 42.915              | 116.147             | 9.06      | 0.948      | 0.733      | 20.087      |
| 102 | 42.833              | 116.133             | 无         | 1.453      | 0.850      | 42.980              | 116.015             | 10.62     | 0.753      | 0.587      | 18.96       |

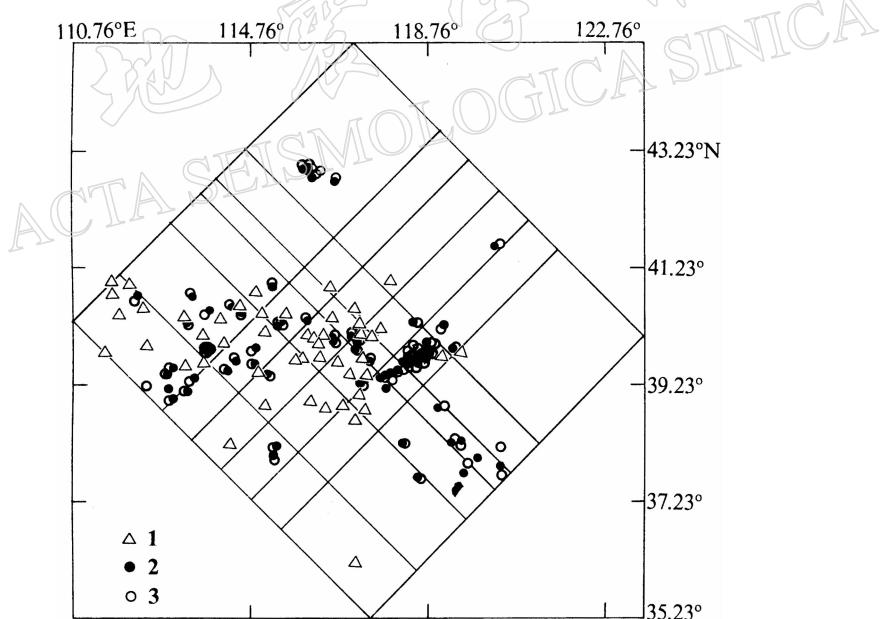


图 2 研究区域的网格划分、地震台站分布以及地震修定前和修定后的震中位置

1——地震台站；2——修定前震中位置；3——修定后震中位置

### 2.3 计算过程

由于所得到的地震观测数据较少,我们不得已采用分步求解地震震源位置和速度结构的方法,即首先根据到时数据采用遗传算法重新求解震源位置。此时速度模型采用滕吉文等(1979)得到的京津唐张地区综合地壳模型。遗传算法的搜索范围为: 地震观测报告给定经度和纬度附近的  $0.6^\circ$  的范围内, 深度在  $3\sim 25$  km 的范围内。遗传算法的种群数  $Q=32$ , 采用数值编码形式。程序的最大迭代次数为 50 次, 交配概率  $P_c=0.9$ , 变异概率采用由 0.1

$\sim 0.001$  随迭代次数指数变化。这一步骤中，除了修定震中外，还对数据进行了筛选，用震相走时残差比台站的震中距作为数据的衡量标准，丢弃比值  $\geq 0.02$  s/km 的震相到时数据。修定完所有地震的震源位置后，在此基础上采用遗传算法确定该区的三维不均匀速度结构。此时除了遗传算法的最大迭代次数采用 300 次外，其余参数同上。此过程得到的反演的拟合差从 6 459.906 25 降到 5 597.139 16。然后，再根据所得的速度结构重新修定震源位置。与第 1 次修定震源位置不同的是，经度和纬度的范围为在第 1 次所得结果的  $0.3^\circ$ ，不对数据进行筛选。修定完所有的震中位置后，再转入进行三维速度结构反演。与第 1 次三维速度反演不同的是，此时速度的限制范围为在第 1 次反演得到的值的  $0.4$  km/s 的搜索空间。此过程反演问题的拟合差由 5 356.285 16 降到 5 205.786 13。如此循环就能得到精确的震源位置和三维速度结构。对于本反演问题在第 2 步迭代过程拟合差的下降已不明显，我们认为已得到较为精确的震源位置和速度结构，不再进行下一步的反演。

### 3 反演结果

#### 3.1 震源位置结果

表 1 和图 2 分别给出了本次反演修定前和修定后的震源位置。由表 1 可知，除 No. 84 地震外，反演修定的震源位置的平均残差和标准残差明显低于地震报告中给定震源位置的平均残差和标准残差。震中差距为：小于 5 km 的地震 28 次，5~10 km 的地震 46 次，10~15 km 的地震 19 次，大于 15 km 的地震 9 次。可见，大部分地震的震中差距较小，其中大于 15 km 的 9 次地震为：5 次地震的震中在内蒙的和尔斯台附近 (No. 67, No. 74, No. 100, No. 101, No. 102)、2 次地震震中在渤海内 (No. 46, No. 55)、1 次地震震中在内蒙凉城北 (No. 35)、1 次地震震中在唐山市 (No. 23)。这 9 次地震中，除唐山市地震位于华北遥测地震台网以外，其余的 8 次地震均位于台网边缘，其定位精度较差是不言而喻的。

#### 3.2 三维速度结构

在第 1 层 ( $0 \sim 5.31$  km, 图 3) 中，由于断层及裂隙的影响，山区和平原的构造轮廓不太明显，但仍能看出北京及其西北山区速度较高。约在  $120.4^\circ\text{E}, 40.8^\circ\text{N}$  有一高速区，正好对应于辽东山地。约在  $116^\circ\text{E}, 43^\circ\text{N}$  有一低速区，正好对应于那日吐周围的沙漠地带。渤海内的庙岛群岛西部有一近似圆状的低速区，孙若昧等 (1993) 曾得出此结论，并指出渤海内强震以及近期的地震活动沿其周边展布，那里是高低速块体的交界部位。在此低速区的西南端有一高速区，此区属于胶东断块，可能是胶东山地的影响。

第 2 层 ( $5.31 \sim 19.73$  km, 图 4) 中，最西边的低速区可能是呼和浩特平原的影响。这一层中，太行山隆起和燕山隆起是较为清晰的高速区。但在太行山和燕山的交错地带有一条状低速区，这可能是构造扭动造成的。冀中凹陷和沧县隆起正好位于太行山隆起的高速区向渤中凹陷的低速区过渡的地带，轮廓不太明显。约在  $37.5^\circ\text{N}, 117.9^\circ\text{E}$  有一低速区，正好对应于济阳凹陷。此低速区的东北部仍有一高速区，这说明由第 1 层的胶东山地的影响仍未消除。北部较大的一块黑色低速区对应于渤中凹陷和辽东湾凹陷。1976 年唐山地震 ( $39^\circ38'\text{N}, 118^\circ11'\text{E}$ ) 及 1679 年三河-平谷地震 ( $40.0^\circ\text{N}, 117.0^\circ\text{E}$ ) 的震源位置正好处于阴山-燕山高速区和北北东向华北平原沉降低速区速度陡变的梯度带上。这两次强震的可能解释是，由于唐山东南部的渤中凹陷的沉降 (对应于低速区) 受到燕山隆起 (高速区) 的阻

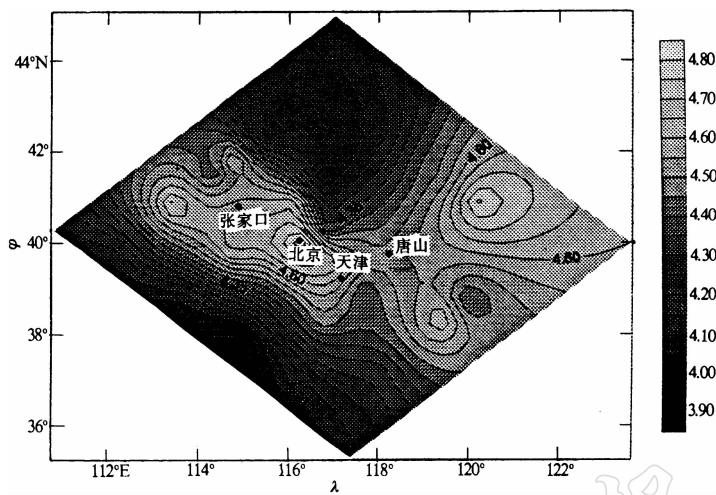


图3 反演得到的京津唐张地区第1层地壳速度

挡,必然造成北西向南东的挤压,即唐山地区处于四面受力的环境中,同时这里又是应力容易集中和释放的地区,有可能因破裂而引发大地震。三河-平谷地震靠近高速区边侧,由于地壳内刚度不同的块体在区域应力作用下发生不均匀的应变和不同步的相对运动,局部应力易于在速度较高的刚体块内积累,高速体的边侧或高低速介质的交界处是介质比较脆弱的地区,容易破裂并发生地震。这一点与孙若昧等(1993)以及孙若昧和刘福田(1995)的认识一致。

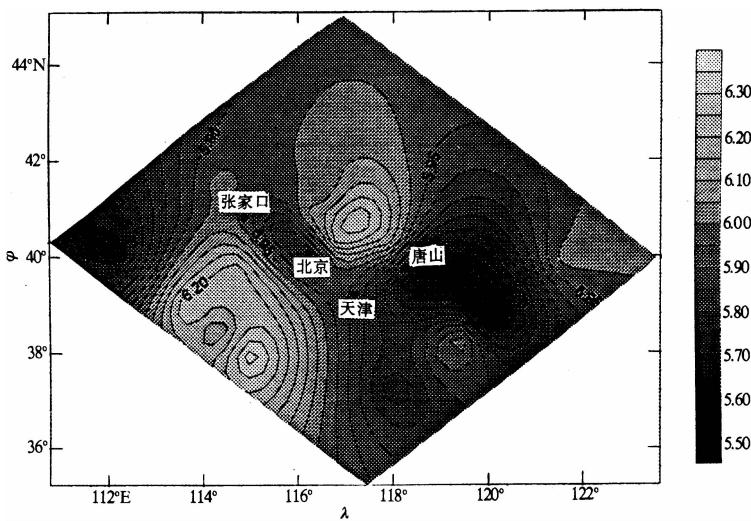


图4 反演得到的京津唐张地区第2层地壳速度

由于我们选用华北遥测台网建成后的有限时间内的有限近震资料,且绕射波的数据较少,况且我们所选用的地震事件的震源深度均在20 km以上,所以第3层穿过的地震射线

相对较少,但所得结果和很多作者的结果是一致的。在第3层( $19.73 \sim 36.40$  km, 图5)中,太行山及北京的西北地区为低速区。这是由于我们在处理成层介质模型时未考虑Moho界面的起伏。滕吉文等(1979)得出的Moho界面的等深图表明,京津唐张地区地壳底面等深线的走向为北东-南西向。北京以北和以西地壳厚度由34 km增厚至44 km。而我们采用的平均地壳厚度为36.4 km。因此,对于北京地区的东南部地区,将把上地幔部分物质归算到地壳中。北京地区西北部将把地壳中的一部分按上地幔计算。由于我们已固定了上地幔的速度,因此,遗传算法将调整第3层中的速度以弥补这种差别,这样就出现了北京西北地区速度低的趋势。但燕山隆起仍为高速区。唐山市仍处于高速区和低速区的梯度带上。在北京和唐山之间(靠近唐山)有一低速区,这与丁志峰等(1994)利用近震资料和SIRT算法反演得到的下地壳的速度结构以及朱露培等(1990)利用远震资料反演结果在50 km深度的切面相吻合。丁志峰和曾融生(1990)曾利用地热资料推断此地区的下部地壳具有塑性性质。曾融生等(1991)认为,这是地幔岩浆通过由地震测深剖面得出的Moho界面断裂(曾融生等,1985)侵入下地壳而造成的。这种认识与唐山地表的高热流值(汪集旸,黄少鹏,1990)相符。该层中,济阳凹陷和渤海凹陷的低速区依然存在。天津南部的沧县隆起对应于高速区。渤海湾为高速区,这与人工地震测深得到的该处为该区的地壳最薄处相一致。辽东湾南端的渤海内在该层为高速区,这也是Moho界面较浅所致。在该层的西部大同附近有一高速区,这与魏梦华等(1980)根据重力资料推断的大同附近的地幔隆起相一致。

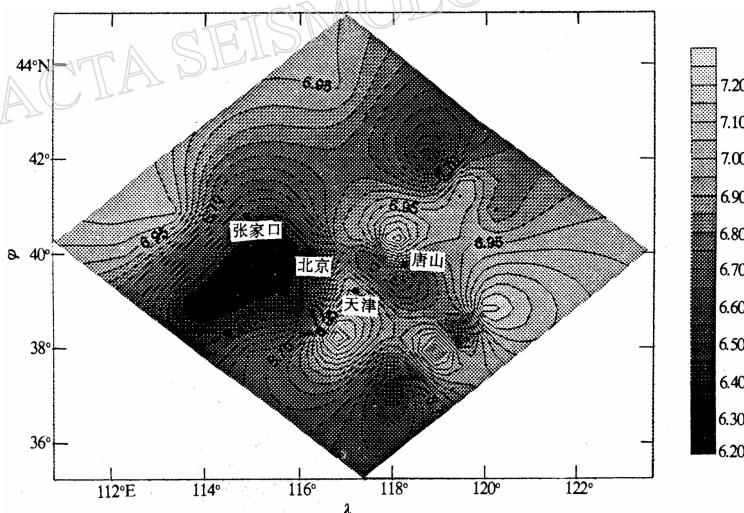


图5 反演得到的京津唐张地区第3层地壳速度

#### 4 讨论与结论

我们将遗传算法引入到三维速度结构和震源位置的非线性反演问题中,利用新建成的华北地震遥测台网联网的近震资料得到了研究区域地壳的三维速度结构和精确的震源位置。得到第1层和第2层的速度结构基本能反映出平原和山地的轮廓,即平原地区速度低、高原地区速度高。这与刘福田等(1986)、孙若昧等(1993)、孙若昧和刘福田(1995)及Shedlock和Rocker(1987)的结果相符。在第3层中,由于计算方法采用平均的Moho面深度,

计算结果有些差别,但可以明显看出,Moho面由东南部的沿海地区向西部、北部山区逐渐下降,这与由多条从沿海至燕山或太行山的西北向剖面测深结果相一致。另外,京津及其东南部一系列Moho界面的隆起和凹陷区呈北东向分布并呈波浪断裂型构造,这大致与浅部地质构造呈反向对应的关系。修定的震源位置的台站到时平均残差和标准残差明显减小,进一步确认了速度结构的可靠性。

唐山地震和三河-平谷地震正好发生在阴山-燕山隆起高速区与华北凹陷低速区速度陡变的梯度带上,较好地解释了地震发生的力学机制。

遗传算法是一种比较快速高效的非线性优化方法,将其用于速度结构和震源位置的反演问题不但是可行的,而且可以在较大的范围内进行全局搜索,不致因初始模型的选取而遗漏最佳模型。本项研究表明,遗传算法在解决自由度较大的反演问题方面是成功的,在地球物理反演问题中有着广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- 丁志峰,曾融生,1990.京津唐地区震源深度分布初探.地震学报,11(3):244~249
- 丁志峰,曾融生,1994.用近震资料反演京津唐地区的地壳三维速度结构.华北地震科学,12(2):14~20
- 刘福田,1984.震源位置和速度结构的联合反演(I)——理论和方法.地球物理学报,27(2):167~175
- 刘福田,曲克信,吴华,等,1986.华北地区的地震层面成像.地球物理学报,29(5):442~449
- 石耀霖,1992.遗传算法在地球物理中的应用.地球物理学报,35(增刊):367~371
- 石耀霖,金文,1995.面波频散反演地球内部构造的遗传算法.地球物理学报,38(2):189~198
- 孙若昧,赵燕来,梅世蓉,1993.渤海及其邻区的地震层析成像.地球物理学报,36(1):44~54
- 孙若昧,刘福田,1995.京津唐地区地壳结构与强震的发生——I.P波速度结构.地球物理学报,38(5):599~607
- 滕吉文,姚虹,周海南,1979.北京,天津,唐山和张家口地区的地壳构造.地球物理学报,22(3):218~235
- 陶春辉,何樵登,王晓春,1994.用遗传算法反演层状弹性介质.石油地球物理勘探,29(2):156~165
- 朱露培,曾融生,刘福田,1990.京津唐张地区地壳上地幔三维P波速度结构.地球物理学报,33(3):267~277
- 汪集旸,黄少鹏,1990.中国大陆区大地热流数据汇编(第二版).地震地质,12(4):351~363
- 魏梦华,史志宏,殷秀华,等,1980.根据重力资料分析华北地区地壳结构的基本形态及其与地震的关系.地震地质,2(2):55~60
- 曾融生,张少泉,周海南,等,1985.唐山地震区的地壳结构及大陆地震成因的探讨.地震学报,7(2):125~142
- 曾融生,朱露培,何正勤,等,1991.华北盆地强震的震源模型兼论强震和盆地的成因.地球物理学报,34(3):288~301
- Aki K, Lee W H K, 1976. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes: Part 1. A homogeneous initial model. *J Geophys Res*, 81(23): 4 381~4 399
- Ashya K, Asano S, Yoshii T, et al, 1987. Simultaneous determination of the three-dimensional crustal structure and hypocenters beneath the Kanto-Tokai District, Japan. *Tectonophysics*, 140: 13~27
- Crosson R S, 1976. Crustal structure modeling of earthquake data; Part 2. Velocity structure of Puget Sound region, Washington. *J Geophys Res*, 81(17): 3 047~3 054
- King S D, 1995. Radial models of mantle viscosity: results from a genetic algorithms. *Geophys J Int'l*, 122: 725~734
- Nolte B, Fraser L N, 1994. Vertical seismic profile inversion with genetic algorithms. *Geophys J Int'l*, 117: 162~178
- Pavlis G L, Booker J R, 1980. The mixed discrete-continuous inverse problem: Application to the simultaneous determination of earthquake hypocenters and velocity structure. *J Geophys Res*, 85(B9): 4 801~4 810
- Sambridge M S, Driekoningen G G, 1992. Genetic algorithms in seismic waveform inversion. *Geophys J Int'l*, 109: 323~342
- Sambridge M S, Gallagher K L, 1993. Earthquake hypocentre location using genetic algorithms. *Bull Seism Soc Amer*, 83(5): 1 467~1 491
- Shedlock K M, Rocker S W, 1987. Elastic wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath the north China basin. *J Geophys Res*, 92(B9): 9 327~9 350
- Spencer C, Gubbins D, 1980. Travel time inversion for simultaneous earthquake location and velocity structure determination in laterally varying median. *J Geophys R astr Soc*, 63: 95~116
- Stoffa P L, Sen M K, 1991. Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms; inversion of plane-wave seismograms. *Geophysics*, 56: 1 794~1 810
- Stoffa P L, Sen M K, 1992. Seismic waveform inversion using global optimization. *J Seismic Exploration*, 1: 9~27
- Zhou R, Tajima F, Stoffa P L, 1995. Application of genetic algorithms to constrain near-source velocity structure for the 1989 Sichuan earthquakes. *Bull Seism Soc Amer*, 85(2): 590~605