

文章编号: 1000-4750(2012)06-0279-06

基于 Hooke-Jeeves 算法的渤海现今应力场优化反演

解秋红^{1,2,3}, 刘保华^{2,3}, 李西双^{2,3}, 刘晨光^{2,3}, 裴彦良^{2,3}, 华清峰^{2,3}

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东, 青岛 266003; 2. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东, 青岛 266061;

3. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东, 青岛 266061)

摘 要: 在分析渤海构造演化背景和地质构造特征的基础上, 根据区域内已有测点的地应力资料, 建立渤海三维应力场优化反演分析模型。通过由有限元法得到的测点处应力值大小及方向与现场实际数据的比较, 构建误差函数作为优化目标函数, 采用 Hooke-Jeeves 优化算法与有限元计算相结合的方法进行优化反演分析, 将 ANSYS 有限元程序作为一个计算模块并通过 Matlab 实现其批处理模式下的循环调用, 完成优化反演计算过程, 得到了渤海浅部的现今应力场分布规律。优化结果分析表明, 该方法可以通过较少的测点数据优化反演得到较合理的构造应力分布, 能够为进一步研究渤海海域现今构造活动提供一定参考。

关键词: 应力场; 反演; 有限元; 优化; Hooke-Jeeves 算法

中图分类号: P553; P554 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.08.0601

OPTIMIZATION INVERSION OF THE PRESENT GROUND STRESS FIELD OF BOHAI SEA BASED ON HOOKE-JEEVES ALGORITHM

XIE Qiu-hong^{1,2,3}, LIU Bao-hua^{2,3}, LI Xi-shuang^{2,3}, LIU Chen-guang^{2,3}, PEI Yan-liang^{2,3}, HUA Qing-feng^{2,3}

(1. Earth Science College, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China;

2. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, Qingdao, Shandong 266061, China;

3. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration People's Republic of China, Qingdao 266061, China)

Abstract: An optimization inversion model of 3D ground stress field of the Bohai Sea was established based on the in-situ stress data from the existing measuring points in the study area and the analyses of tectonic evolution background and characteristics of Bohai Sea. By comparing the stress values and directions obtained at measuring points by means of finite element method with the in-situ measured data, an error function was established and taken as the optimization object function. The optimization inversion analysis was carried out by combining the Hooke-Jeeves optimization algorithm and the finite element method. The optimization inversion calculation process was completed by taking the finite element analysis program ANSYS as a calculation module and calling circularly the batch model through the Matlab platform, thus obtaining the distribution law of the present shallow ground stress field in Bohai Sea. The research results have shown that the method presented in the paper can be used to inverse a more reasonable stress field distribution by using the data from less measuring points, thus offering a reference for further study of the tectonic activity in Bohai Sea.

Key words: ground stress field; inversion; finite element method; optimization; Hooke-Jeeves algorithm

收稿日期: 2010-08-23; 修改日期: 2010-11-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90814011); 863 计划海洋技术领域重点项目(2009AA093401); 国家自然科学基金项目(40606014)

通讯作者: 刘保华(1960—), 男, 山东嘉祥人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事海洋地球物理调查和研究(E-mail: bhliu@fio.org.cn).

作者简介: 解秋红(1982—), 女, 山东即墨人, 博士生, 主要从事海洋地球物理和海底构造等方面的研究(E-mail: xqh@fio.org.cn);

李西双(1976—), 男, 山东嘉祥人, 副研究员, 博士, 主要从事海洋地球物理和海底构造等方面的研究(E-mail: lxs@fio.org.cn);

刘晨光(1976—), 男, 河北定兴人, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋地球物理调查和研究(E-mail: lcg@fio.org.cn);

裴彦良(1977—), 男, 河北廊坊人, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋地球物理方面研究(E-mail: peiyanliang@fio.org.cn);

华清峰(1981—), 男, 山东章丘人, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋地球物理方面研究(E-mail: hqf@fio.org.cn).

渤海海域地处渤海湾盆地东侧中部，是中国东部地区新近纪以来构造活动最为强烈的地区之一，现代构造活动强烈，是中国东部强震重复率最高的地区；同时，渤海海域也是渤海湾盆地中油气资源丰富集的地区，是油气开发等海洋工程的集中区域。因此，研究该区应力场分布规律，对渤海海域地震活动性的研究以及对渤海海域油气开发等海洋工程都有一定的参考意义。

由于地质构造的复杂性和地应力资料的有限性，在采用有限元法进行应力场计算时，边界条件和加载方式等往往成为数值模拟分析中的难题。陈晓利、陈国光等^[1-2]曾采用二维有限元方法模拟渤海海域的应力场分布，其中，边界条件是按照大范围区域应力场的主应力值与方向施加受力边界或根据 GPS 观测资料施加位移边界，忽略了原有构造应力状态的影响，仅能从变形场变化趋势加以分析，不具有绝对值意义。在其它研究区，刘聪、陈志德、陈书平等^[3-5]针对边界条件的未知性，多采用边界载荷试凑法或边界载荷调整法，但这种方法对于分析人员的要求较高，且工作量很大。采用优化反演技术，将地应力实测资料作为数学模型的约束条件并构造目标函数，通过数值方法进行反分析，反演得到最优边界条件组合，是一种方便有效的途径^[6-7]。

本文针对渤海海域的构造演化背景和地质构

造特征，将有限元法与优化算法相结合，建立渤海海域应力场的优化反演模型。由于本文反演模型的目标函数很复杂，要计算目标函数的导数比较困难，采用了不需要计算目标函数导数的 Hooke-Jeeves^[8]直接搜索法进行优化分析。Hooke-Jeeves 直接搜索法由 Matlab 编程实现，应力场的有限元计算由 ANSYS 完成，并通过 Matlab 实现 ANSYS 批处理模式下的循环调用，完成优化反演计算过程。最后通过对渤海海域应力场优化反演结果的分析，说明该法的合理性和实用性。

1 区域地质概况及有限元模型

研究区渤海海域是中国东部陆缘的一个裂谷型盆地，位于华北地区的中北部，是在华北稳定地块上发育起来的一个中生代、新生代断陷盆地，大地构造上是渤海湾盆地被水覆盖的部分。渤海湾盆地东界为郯庐断裂带，南界为鲁西隆起，西界为太行山东缘断裂带，北界为燕山褶皱带和辽西隆起区。渤海构造区划包括渤中拗陷、下辽河拗陷、黄骅拗陷、济阳拗陷以及埕宁隆起的一部分，其中仅有渤中拗陷为渤海湾盆地独立的海域构造单元，其余 3 拗 1 隆都是渤海湾盆地陆上构造单元向海区的延伸，见图 1。为了保证构造单元的完整性和大地构造动力学成因的统一性，文中将 3 拗 1 隆的陆域部分也包括在模型中。

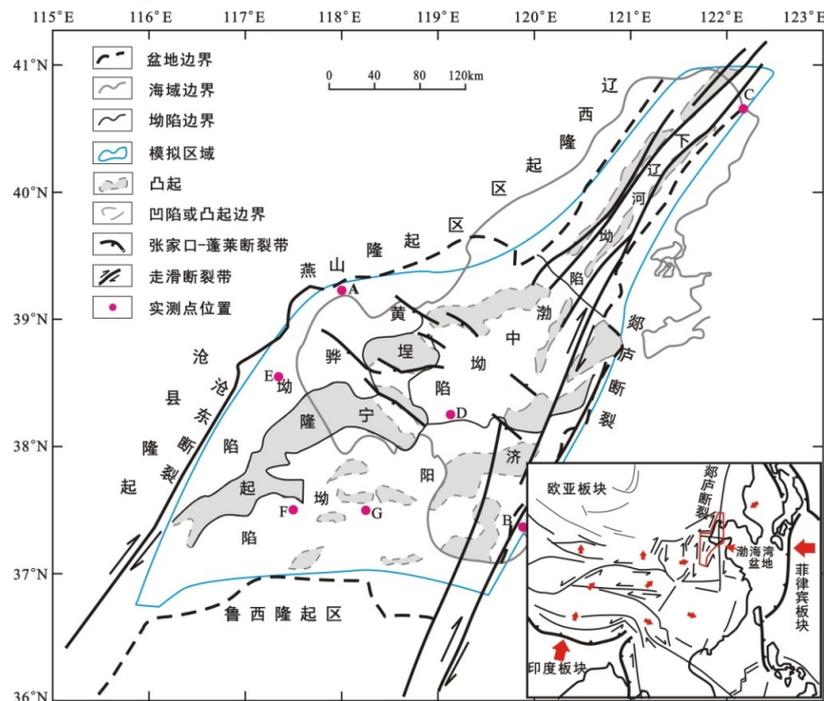


图 1 渤海海域构造背景及构造单元划分图^[9]

Fig.1 Tectonic setting and tectonic units division diagram of Bohai Sea

综合以上地质概况分析及模型建立的合理性，将实际的应力场模拟边界定为：北界为燕山隆起和辽西隆起，南界定在济阳拗陷和鲁西隆起的分界处——齐河广饶断裂，东界为郯庐断裂，西界为沧东断裂，模型按照地形测量参数建模，底部取-2000m。自新近纪以来，印度板块向欧亚板块会聚，太平洋板块向欧亚大陆俯冲，形成对渤海湾盆地的推挤作用^[10-13]。因此，有限元模型边界可作如下简化：模型东西边界施加压力与剪切力；南北边界因辽西隆起与鲁西隆起的阻挡，施加位移约束作用；底部施加垂向约束。采用三维 8 节点实体单元进行计算，共划分了 228000 个单元，245721 个节点。图 2 为有限元计算模型图。

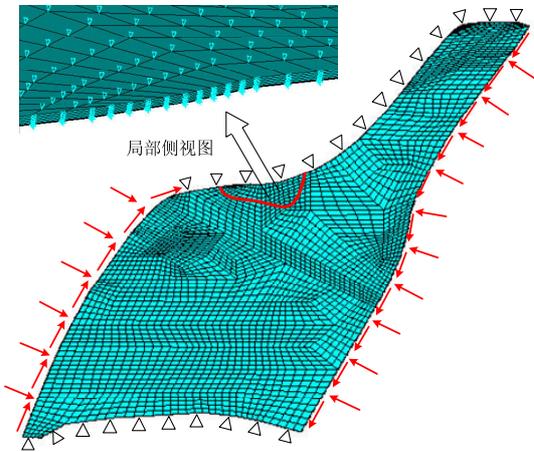


图 2 研究区有限元计算模型图

Fig.2 The finite element calculation model of study area

2 基于 Hooke-Jeeves 方法的应力场优化反演

渤海海域应力场反演的基本思路是，先预置初始边界载荷的参数向量 $p_1^0, p_2^0, \mathbf{L}, p_n^0$ ，采用有限元方法计算该参数向量作用下测点处的应力响应值，并通过逐步改正未知参数试算值使误差函数趋于极小值的迭代算法，逼近测点处应力的实测值。

误差函数是用计算应力与实测应力的偏差来表示，本文误差函数共有 4 个参数，包括最大主应力、最小主应力的大小及方向。记现场实测点的参数向量为 $S_l = (\sigma_1^l, \sigma_3^l, d_1^l, d_3^l)$ ，有限元计算所得的相应测点的参数向量为 $S_c = (\sigma_1^c, \sigma_3^c, d_1^c, d_3^c)$ ，则误差函数可表示为：

$$X(p_1, p_2, \mathbf{L}, p_n) = \sum_{i=1}^m (S_l - S_c)^2 = \sum_{i=1}^m [(\sigma_1^l - \sigma_1^c)^2 + (d_1^l - d_1^c)^2 + (\sigma_3^l - \sigma_3^c)^2 + (d_3^l - d_3^c)^2] \quad (1)$$

式中： $p_1, p_2, \mathbf{L}, p_n$ 为边界载荷参数变量； m 为测点个数； σ_1^l, σ_3^l 为现场实测点的最大主应力、最小主应力值； d_1^l, d_3^l 为测点处相对应的最大主应力、最小主应力的方向； $\sigma_1^c, \sigma_3^c, d_1^c, d_3^c$ 为有限元计算得到的最大主应力、最小主应力以及最大主应力、最小主应力的方向。

应力场的反演问题往往很复杂，尚需要加一些约束条件作约束优化问题处理，才能保证解的稳定性和唯一性，因此，渤海海域现今应力场的优化反演的数学提法为：

$$\begin{aligned} \text{Find: } & P = \{p_i, i=1, 2, \mathbf{L}, n\} \\ \text{Min: } & X(p_1, p_2, \mathbf{L}, p_n) \\ \text{s.t.: } & \underline{p}_i \leq p_i \leq \bar{p}_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中： P 为待求边界载荷向量； $\underline{p}_i, \bar{p}_i$ 为边界载荷参数的上下界，将文献[14]中给出的区域应力场的最大主应力值的 10 倍作为上界，在压应力背景下采用 OMPa 为下界。

Hooke-Jeeves 方法是一种求解无约束最优化问题的直接方法，也可通过罚函数法将非线性约束最优化问题转化为无约束优化问题^[15]，该方法不需要计算目标函数的导数，就可以完成寻找一组参数 $p_1, p_2, \mathbf{L}, p_n$ 使目标函数趋于极小，是一种简单而有效的方法。该方法由探测搜索和模式移动两部分组成。探测搜索指的是在某个已知点周围，沿坐标轴方向进行探测，目的是寻找一个使目标函数值更小的点。模式移动指的是在原有方向上改变步长，使目标函数值向极小值点靠近。Hooke-Jeeves 方法的基本思想就是将探测搜索和模式移动这两部分交替进行，分析步骤如下：

设有目标函数 $f(x)$ ，坐标方向 $e_i (i=1, 2, \mathbf{L}, n)$ ，给定初始步长 δ ，加速因子 α ，任取初始点 $x^{(1)}$ 作为第 1 个基点，下面以 $x^{(i)}$ 表示第 i 个基点，在每轮的轴向移动中，自变量用 y 表示，即 y^i 是沿 e_i 方向探测的出发点。

首先，从 $y^{(1)}=x^{(1)}$ 出发进行探测移动，先沿 e_1 探测，如果 $f(y^{(1)} + \delta e_1) < f(y^{(1)})$ 则探测成功，令 $y^{(2)} = y^{(1)} + \delta e_1$ ，并从 $y^{(2)}$ 出发，沿 e_2 进行探索，否则，沿 e_1 方向的探索失败，再沿 $-e_1$ 探测，如果 $f(y^{(1)} - \delta e_1) < f(y^{(1)})$ ，则沿 $-e_1$ 方向探测成功，令 $y^{(2)} = y^{(1)} - \delta e_1$ ，并从 $y^{(2)}$ 出发，沿 e_2 进行探索，如果 $f(y^{(1)} - \delta e_1) \geq f(y^{(1)})$ ，则沿 $-e_1$ 方向的探测也失败，令 $y^{(2)} = y^{(1)}$ ，再从 $y^{(2)}$ 出发，沿 e_2 进行探索，方法同上，得到的点记作 $y^{(3)}$ ，按此方式下去，直

至沿 n 个坐标方向探测完毕, 得到点 $y^{(n+1)}$ 。如果 $f(y^{(n+1)}) < f(x^{(1)})$, 则 $y^{(n+1)}$ 作为新的基点, 记作 $x^{(2)} = y^{(n+1)}$ 。此时, 沿方向 $x^{(2)} - x^{(1)}$ 进行模式移动, 令新的 $y^{(1)}$ 为:

$$y^{(1)} = x^{(2)} + \alpha(x^{(2)} - x^{(1)}) \quad (3)$$

模式移动之后, 以 $y^{(1)}$ 为基点进行探测移动, 探测仍沿坐标轴方向进行, 探测完毕, 得到的点记作 $y^{(n+1)}$ 。如果 $f(y^{(n+1)}) < f(x^{(2)})$, 则表明模式移动成功, 于是取新的基点 $x^{(3)} = y^{(n+1)}$, 再沿方向 $x^{(3)} - x^{(2)}$ 进行模式移动。如果 $f(y^{(n+1)}) \geq f(x^{(2)})$, 则表明模式移动及此次模式移动之后的探测移动均无效, 于是退回到基点 $x^{(2)}$, 减小步长 δ , 再从 $x^{(2)}$ 出发, 依次沿各坐标轴方向进行探测移动, 直到满足精度要求, 即步长 δ 小于指定值。本文 $\delta = 0.04\text{MPa}$, $\alpha = 2$ 。

表 1 测点处优化结果与实际结果的比较

Table 1 Comparison of real results and optimal results of measuring points

测点	日期	深度/m	实际值 σ_1		优化值 σ_1		实际值 σ_3		优化值 σ_3	
			数值/MPa	方向/(°)	数值/MPa	方向/(°)	数值/MPa	方向/(°)	数值/MPa	方向/(°)
A	1976 年	6~15	2.5	313	2.651	317.035	1.7	43	1.761	47.035
B	\	10	6.01	288.5	5.526	279.497	3.81	198.0	3.447	189.497
C	1975 年	表层	16.6	276	10.997	287.049	10.4	186	7.228	197.049
D	\	10	2.2	85	2.354	85.619	1.5	355	1.560	355.619
E	1974 年	10	2.5	281	2.756	292.542	1.5	191	1.636	202.542
F	\	5~10	5.65	80	5.185	87.874	3.84	350	3.673	358.874
G	2003 年	5~10	3.87	82	4.014	89.554	2.63	352	2.780	359.554

从表 1 中数据可以看出, 由本文方法得到的测点处应力的相对误差除 C 测点的应力值误差较大外, 其它都控制在 10% 以内; 而应力方向的相对误差则全部控制在 10% 以内, 因此各测点处由优化反演得到的应力值和应力方向都达到或非常接近实际数据, 说明本文所采用方法是合理的, 另外由于整个优化反演计算过程是由程序完成的, 所以能够节省大量工作量。

图 3~图 6 分别为 10m 深最大水平主应力方位图、最大水平主应力等值线图、最小水平主应力等值线图以及最大剪应力等值线图, 图 4~图 6 中所用应力值均进行了转换, 符合地质学规定。其中图 4 和图 5 等值线间距为 1.0MPa; 图 6 等值线间距为 0.1MPa。

由图 3 可以看出, 研究区最大水平主应力方向的分区性特征明显。本文将其划分为四个区域, 区域 I 位于下辽河拗陷, 最大水平主应力方向特征是 NWW 为主; 区域 II 包含了渤中拗陷的全部和下辽河拗陷、济阳拗陷以及埕宁隆起的边界部分, 最大水平主应力的方向特征是 NEE-NE, 是海域的主体部分; 区域 III 和区域 IV 同时占据海域和陆域, 最大水平主应力的方向特征分别是 NW-NWW 和近 EW 向。与陈晓利^[1]、陈国光^[3]等利用二维有限元模拟得到的主应力场方向相比, 在渤海主体部分渤中拗

3 优化反演结果分析

按照前文提出的优化反演思路和方法, 将边界处的不同方向的挤压力与剪切力设为 12 个优化变量, 由 3 个(A、B 和 C)原地应力测量的应力值参数^[14,16-17]和根据水压致裂法获得的应力数据回归得到的另外 4 个测点的浅层应力值参数(D 来自油田数据, E、F 和 G 来自文献[18-19]), 并根据式(1)构件误差函数作为目标函数。通过 Matlab 编程实现 Hooke-Jeeves 优化算法, 并通过 Matlab 调用批处理模式下的 ANSYS 程序试算不同边界条件下渤海海域现今应力场的有限元计算, 最终实现渤海海域现今应力场的优化反演分析。优化结果与实测结果的比较如表 1 所示。

陷处, 是近乎一致的, 但在黄骅拗陷和埕宁隆起的海域部分以及下辽河拗陷方向存在偏差。另外, 根据震源机制解^[3,20-21]和 GPS 资料^[22-24]推演并分析得到的渤海及其周边大范围较一致的主应力场方向是 NE-NEE, 这也与文中计算得到的主要方向是吻合的。

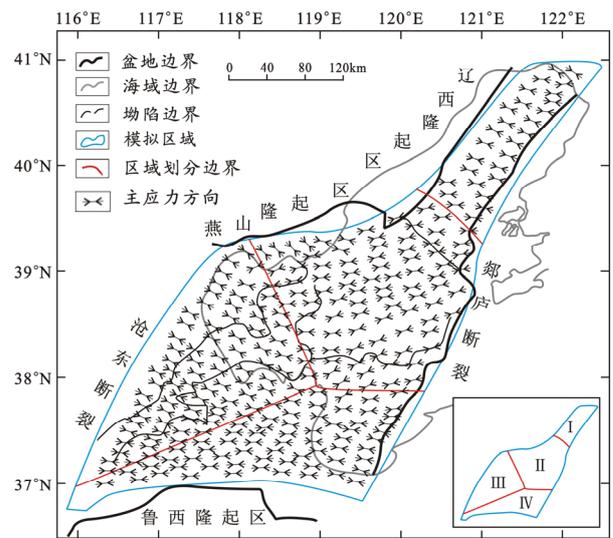


图 3 最大水平主应力方位图

Fig.3 Orientation diagram of the maximum horizontal principal stress

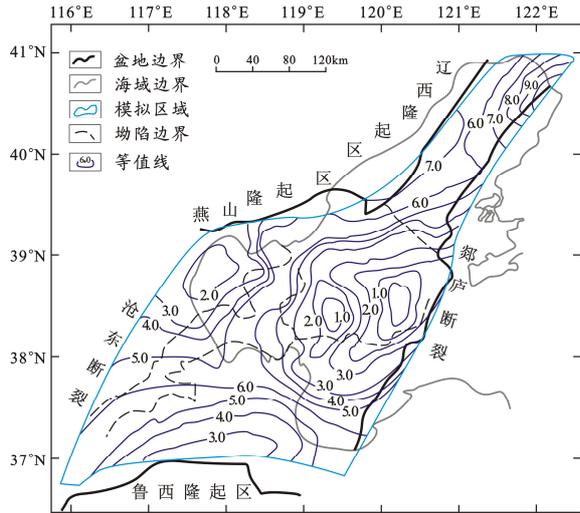


图4 最大水平主应力等值线图

Fig.4 Isoline diagram of the maximum horizontal principal stress

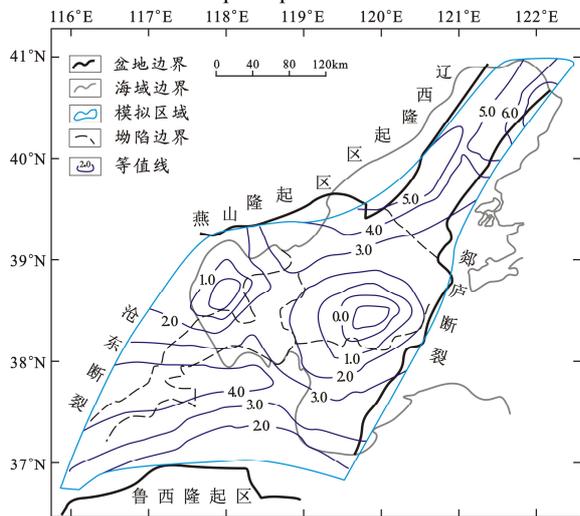


图5 最小水平主应力等值线图

Fig.5 Isoline diagram of the minimum horizontal principal stress

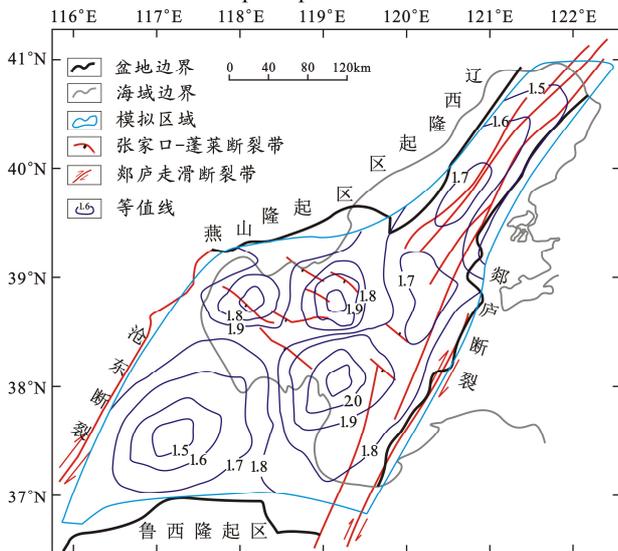


图6 最大剪应力等值线图

Fig.6 Isoline diagram of the maximum shear stress

根据图 4，最大水平主应力总体趋势是北部比南部应力值高，中部渤中拗陷处应力值较小；西部总体应力值高于东部，埭宁隆起处应力值较大。渤中拗陷的渤东拗陷和渤中拗陷应力值较低，其中渤东拗陷处最低。由图 5 可知，渤中拗陷处最小水平主应力值较小，海域西边界黄骅拗陷处最小水平主应力值也较小。总体而言，北部的最小水平主应力值较高。渤中拗陷内张家口-蓬莱断裂处最小水平主应力值是研究区最小的。从最大水平主应力和最小水平主应力的等值线图上都看到，东北边界处存在明显的应力集中。该连接点处于碰撞带和盆地的连接部位，本身就存在应力集中，测点 C 实测值较其它几个实测点偏大。优化反演过程中优化函数通过调整边界条件，使优化结果必须与实测结果相近，所以优化结果在该位置确实体现了应力集中，但并未出现应力过大现象。

图 6 中最大剪应力大小的总体特征是张家口-蓬莱断裂带处剪应力值较高，最高值是处于该断裂带渤中拗陷的位置，研究区的陆域和下辽河拗陷位置剪应力值都较小；郟庐断裂带处，剪应力值较其附近的结果低一些，并且梯度较小。最大剪应力高值出现在地震频发的张家口-蓬莱断裂带，与冯向东^[25]认为华北地区的中强地震一般位于最大剪应力的高值或高梯度区域的观点是相一致的。

4 结论

结果分析表明，研究区主体部分最大水平主应力方向以 NEE-NE 为特征，济阳拗陷近 EW 向，其它部分以 NW-NWW 为主；最大水平主应力值总体趋势是北部比南部高，中部渤中拗陷处较小，西部总体应力值高于东部，埭宁隆起处应力值较大；最小水平主应力值北部较高，渤中拗陷处较小；最大剪应力值总体特征是张家口-蓬莱断裂带处较高，研究区的陆域和下辽河拗陷位置都较小，郟庐断裂带较其附近的结果低一些，并且梯度较小。

本文采用优化算法与有限元计算相结合，通过优化反演得到渤海现今应力场，能够较好地与实测应力吻合，且该方法由较少数量的实际数据优化反演得到比较合理的应力场分布，能够为进一步进行渤海区域应力场分析提供参考。由于文中方法是基于测点信息进行优化反演分析的，测点数量及测点数据的精确度都会对应力场的计算结果产生较大影响，因此，在以后的研究中应尽可能地增多测点数据并提高数据的测量精度。

参考文献:

- [1] 陈晓利, 陈国光, 叶洪. 渤海海域现代应力场的数值模拟[J]. 地震地质, 2005, 27(2): 289—297.
Chen Xiaoli, Chen Guoguang, Ye Hong. A mathematical simulation for the tectonic stress field of the Bohai Sea area [J]. Seismology and Geology, 2005, 27(2): 289—297. (in Chinese)
- [2] 陈国光, 徐杰, 马宗晋, 等. 渤海盆地现代应力场与强震活动[J]. 地震学报, 2004, 26(4): 396—403.
Chen Guoguang, Xu Jie, Ma Zongjin, et al. Recent tectonic stress field and major earthquakes of the Bohai Sea basin [J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(4): 396—403. (in Chinese)
- [3] 刘聪, 黄晓波, 樊太亮, 等. 塔中地区奥陶系现今应力场模拟及裂缝预测[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(4): 475—477.
Liu Cong, Huang Xiaobo, Fan Tailiang, et al. The simulation of present tectonic stress field and the prediction of tectonic fractures of ordovician in Tazhong area, tarim basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(4): 475—477. (in Chinese)
- [4] 陈志德, 蒙启安, 万天丰, 等. 松辽盆地古龙凹陷应力场弹塑性增量法数值模拟[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 483—491.
Chen Zhide, Meng Qi'an, Wan Tianfeng, et al. Numerical simulation of tectonic stress field in Gulong depression in Songliao basin using elastic-plastic increment method [J]. Earth Science Foresters, 2002, 9(2): 483—491. (in Chinese)
- [5] 陈书平, 戴俊生, 宋全友, 等. 胶莱盆地应力场特征及数学模拟[J]. 石油大学学报, 1998, 22(3): 19—25.
Chen Shuping, Dai Junsheng, Song Quanyou, et al. Features of tectonic stress fields in Jiaolai basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 1998, 22(3): 19—25. (in Chinese)
- [6] 付玉华, 王兴明, 袁海平. 应力场边界载荷反演的有限元逆逼近法[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1850—1855.
Fu Yuhua, Wang Xingming, Yuan Haiping. Finite element inverse analysis of boundary load for tectonic stress fields [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1850—1855. (in Chinese)
- [7] 郭明伟, 李春光, 王水林, 等. 优化位移边界反演三维初始地应力场的研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1269—1274.
Guo Mingwei, Li Chunguang, Wang Shuilin, et al. Study on inverse analysis of 3-D initial geo-stress field with optimized displacement boundaries [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1269—1274. (in Chinese)
- [8] Hooke R, Jeeves T A. Direct search solution of numerical and statistical problems [J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1961, 8(2): 221—229.
- [9] Ye Hong, Zhang Botao, Mao Fungying. The cenozoic tectonic evolution of the Great North China: Two types of rifting and crustal necking in the Great North China and their tectonic implications [J]. Tectonophysics, 1987, 133: 217—227.
- [10] 李延兴, 马宗晋, 张静华, 等. 渤海盆地的现今扩张运动[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1483—1489.
Li Yanxing, Ma Zongjin, Zhang Jinghua, et al. Current-day extending motion of Bohai Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(6): 1483—1489. (in Chinese)
- [11] 张静华, 李延兴, 郭良迁, 等. 用GPS测量结果研究华北现今构造形变场[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(3): 40—46.
Zhang Jinghua, Li Yanxing, Guo Liangqian, et al. Study on present-day deformation and strain field in North China by use of GPS data [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(3): 40—46. (in Chinese)
- [12] 郑勇, 傅容珊, 熊熊. 中国大陆及周边地区现代岩石圈演化动力学模拟[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 415—427.
Zheng Yong, Fu Rongshan, Xiong Xiong. Dynamic simulation of lithospheric evolution from the modern China mainland and its surrounding areas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(2): 415—427. (in Chinese)
- [13] 万天丰. 中国第四纪的构造事件与应力场[J]. 第四纪研究, 1994, 14(1): 48—55.
Wan Tianfeng. Tectonic event and stress field of quaternary in China [J]. Quaternary Sciences, 1994, 14(1): 48—55. (in Chinese)
- [14] 丁旭初, 张文涛. 中国大陆东部现今构造应力状态[J]. 地震学报, 1988, 10(2): 25—39.
Ding Xuchu, Zhang Wentao. State of modern tectonic stress field in East China mainland [J]. Acta Seismologica Sinica, 1988, 10(2): 25—39. (in Chinese)
- [15] Wan Yusun, Yuan Yaxiang. Optimization theory and methods: Nonlinear programming [M]. New York: Springer, 2006: 455—490.
- [16] 苗胜军, 万林海, 来兴平, 等. 三山岛金矿地应力场与地质构造关系分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3996—3999.
Miao Shengjun, Wan Linhai, Lai Xingping, et al. Relation analysis between in-situ stress field and geological tectonism in Sanshandao gold mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3996—3999. (in Chinese)
- [17] 李方全, 刘光勋. 我国现今地应力状态及有关问题[J]. 地震学报, 1986, 8(2): 156—171.
Li Fangquan, Liu Guangxun. The present state of stress in China and related problems [J]. Acta Seismologica Sinica, 1986, 8(2): 156—171. (in Chinese)

(参考文献[18]—[25]转第299页)

- Engineering Structures, 2003, 25: 779–788.
- [5] Kroeker D. Structural analysis of transmission towers with connection slip modeling [D]. Canada: Canada University of Manitoba, 2001.
- [6] Kitipornchai S, Al-Bermani F, Kang W J, et al. Some practical aspects of modeling lattice towers [C]. Proceedings of the Fourth International Conference on Advances in Steel Structures: Volume 1. Shanghai: Tongji University Press, 2005: 369–375.
- [7] 隋允康, 潘天群. 结构节点模型的“弗晰”精化处理[J]. 计算结构力学及其应用, 1989, 6(3): 45–51.
Sui Yunkang, Pan Tianqun. ‘Fuzzy’ precision processing of structural model of nodes in finite element method [J]. Computational Structural Mechanics and Applications, 1989, 6(3): 45–51. (in Chinese)
- [8] 隋允康, 丁殿民. 结构节点的中介状态对力学分析和优化设计的影响[M]. 上海力学, 1992, 13(2): 6–12.
Sui Yunkang, Ding Dianmin. The property of the nodal transition in the FEM analysis engineering structures and its influences on the analysis and on the optimum design [J]. Shanghai Journal of Mechanics, 1992, 13(2): 6–12. (in Chinese)
- [9] 曾宪文, 李新民, 刘士彬. 弹性节点的模糊分析及其在输电塔中的应用[J]. 东北电力学院学报, 2000, 20(1): 25–29.
Zeng Xianwen, Li Xinmin, Liu Shibin. Fuzzy analyses and application of elasticity node at the transmission line tower [J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2000, 20(1): 25–29. (in Chinese)
- [10] 肖圣燮, 王平义, 吕恩琳. 模糊数学在土木与水利工程中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Xiao Shengxie, Wan Pingyi, Lv Enlin. Applications on fuzzy mathematics in civil and water conservancy project [M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [11] 孙冬明. 采动区送电线路铁塔力学计算模型及塔-线体系共同作用机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
Sun Dongming. Study on mechanic model of transmission line steel tower and interaction mechanism of tower-line system located at mining area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010. (in Chinese)

(上接第 284 页)

- [18] 陈彭年, 陈宏德, 高莉青. 世界地应力实测资料汇编[M]. 北京: 地震出版社, 1990: 1–40.
Chen Pengnian, Chen Hongde, Gao Liqing. Assembly of in-situ stress in world [M]. Beijing: Earthquake Press, 1990: 1–40. (in Chinese)
- [19] 王红才, 孙东生, 王连捷, 等. 利津油田现代地应力测量及其应用[C]. 第七届全国地质力学学术研讨会, 2006: 277–280.
Wang Hongcai, Sun Dongsheng, Wang Lianjie, et al. Measure and application of modern in-situ stress in Li-jin oil field [C]. 7th National Geomechanic Symposium, 2006: 277–280. (in Chinese)
- [20] 董旭光, 周翠英, 华爱军. 渤海海峡及邻区现代小震震源机制解分析[J]. 内陆地震, 1999, 13(1): 7–16.
Dong Xuguang, Zhou Cuiying, Hua Aijun. The analysis on focal mechanism solutions of recent minor earthquakes in Bohai Straits and its vicinity [J]. Inland Earthquake, 1999, 13(1): 7–16. (in Chinese)
- [21] 董旭光, 周翠英. 燕山-渤海地震带的现今构造应力环境[J]. 华南地震, 2000, 20(1): 16–23.
Dong Xuguang, Zhou Cuiying. Circumstance of recent tectonic stress of Yanshan-Bohai seismic zone [J]. South China Journal of Seismology, 2000, 20(1): 16–23. (in Chinese)
- [22] 李延兴, 徐杰, 张静华, 等. 渤海盆地及邻区现今构造运动的基本特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(6): 1–8.
Li Yanxing, Xu Jie, Zhang Jinghua, et al. Basic characteristics of present-day tectonic movement in Bohai basin and its adjacent areas [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(6): 1–8. (in Chinese)
- [23] 李瑞莎, 崔效锋, 刁桂苓, 等. 华北北部地区现今应力场时空变化特征研究[J]. 地震学报, 2008, 30(6): 570–580.
Li Ruisha, Cui Xiaofeng, Diao Guiling, et al. Temporal and spatial variation of the present crustal stress in northern part of North China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 30(6): 570–580. (in Chinese)
- [24] 刘峡, 傅容珊, 杨国华, 等. 用GPS资料研究华北地区形变场和构造应力场[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(3): 33–39.
Liu Xia, Fu Rongshan, Yang Guohua, et al. Deformation field and tectonic stress field constrained by GPS observations in North China [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006, 26(3): 33–39. (in Chinese)
- [25] 冯向东, 魏东平, 陈棋福. 基于观测应力场的大华北地区动力学机制探讨[J]. 地震学报, 2005, 27(1): 1–10.
Feng Xiangdong, Wei Dongping, Chen Qifu. Discussion on the dynamic mechanism of Great North China area based on the observed stress data [J]. Acta Seismologica Sinica, 2005, 27(1): 1–10. (in Chinese)