

研究简报

# 鄂尔多斯周邻地区地壳应力场

## ——一个简化的力学模型

牛志仁 张逸

(陕西省地震局)

### 摘 要

本文提出了鄂尔多斯周邻地壳应力场的一个简化力学模型。在这个模型中,欧亚板块被简化为一个无限大 Hooke 薄板,稳定而且完整性好的鄂尔多斯地块则被模拟为一个嵌入在该板内的刚性椭圆核。由于印度洋板块碰撞和太平洋板块的俯冲,使该板承受着一种沿太平洋板块向西俯冲方向的单向压缩。利用该问题的 Muskhelishvili 解,分析和计算了鄂尔多斯地块周邻地区地壳应力场,对该地块周邻地壳应力场特征提出了一种可能的解释。认为华北地壳应力场与鄂尔多斯地块周邻应力场可能是同一种力源作用下形成的,鄂尔多斯地块周围存在小区域应力场的原因可能反映了介质明显的非均一性。

近几年的研究发现,华北地区地壳的现代应力场具有相当好的统一性和均匀性。 $P$ 轴为北东东-南西西向, $T$ 轴为北北西-南南东向,并且都接近水平; $N$ 轴较陡。就整个华北地区而言,各地主应力轴方位和仰角虽然有所差别,但变化不大<sup>[1,2,3]</sup>。薛宏运、鄢家全的最近工作表明,位于华北西部的鄂尔多斯地块周围的地壳应力场与华北广大地区的地壳应力场不同,在那里存在着一个小区域应力场<sup>[4]</sup>。既然,鄂尔多斯地块嵌入在中国大陆中部的地壳内,可以设想这个小区域的应力场在成因上与华北地壳应力场有密切联系。本文提出一个简化的力学模型,对此进行简单讨论。

假设华北地壳所属的欧亚板块为一等厚的 Hooke 板,其水平尺度远大于厚度,并且不考虑它的曲率。同时为了模拟稳定而且完整性好的鄂尔多斯地块的存在,我们在此板内嵌入了一个刚性椭圆核。该 Hooke 板承受

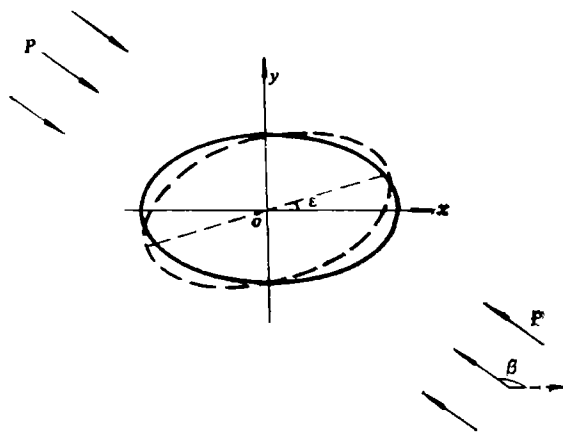


图1 简化的计算模型

Fig. 1 A simplified calculation model

着印度洋板块和太平洋板块碰撞、俯冲所引起的远场作用。假设这个远场作用主要是一种沿太平洋向西俯冲方向的单向压缩。另外,假定垂直力对这些地区现代构造应力场的作用可以忽略。我们简化的力学模型便是一个在远场承受单向压缩的,具有椭圆形刚性核的无限大 Hooke 平板的平面应力问题(图 1)。

它的解以应力表示为<sup>[5]</sup>

$$\begin{aligned} N_1 + N_2 &= 2[\Phi(z) + \overline{\Phi(z)}] \\ -(N_1 - N_2)e^{-2i\alpha} &= 2[\bar{z}\Phi'(z) + \Psi(z)] \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi(z) &= \varphi'(z) \quad \Psi(z) = \psi'(z) \\ \varphi(\zeta) &= -\frac{p}{4}R\zeta + \left(2\mu m \varepsilon i - \frac{p}{4}m + \frac{p}{2}e^{2i\beta}\right)\frac{R}{\varphi\zeta} \\ \psi(\zeta) &= \frac{p}{2}e^{-2i\beta}R\zeta + \frac{2\mu\varepsilon Ri}{\zeta} + \frac{PR}{4}\left(\frac{(1+m^2)\zeta}{\zeta^2-m} - \frac{\varphi}{\zeta}\right) \\ &\quad + \left(2\mu m \varepsilon i - \frac{pm}{4} + \frac{p}{2}e^{2i\beta}\right)\frac{1+m\zeta^2}{\zeta^2-m}\frac{R}{\varphi\zeta} \\ z &= R\left(\zeta + \frac{m}{\zeta}\right) \end{aligned}$$

复平面  $z = x + iy$  的坐标轴系的选取如图 1 所示,原心在椭圆的中心  $O$  处,  $x$  轴与椭圆长轴重合,  $y$  轴与短轴重合。表达式中的  $N_1, N_2$  分别为板面内的最大和最小主应力,  $\alpha$  为  $N_1$  主轴与  $Ox$  轴的夹角,  $p$  为作用在远场的挤压应力的值,  $\beta$  为  $Ox$  轴与远场挤压力方向的夹角。  $m = (a-b)/(a+b)$  为椭圆形状参数,  $R = (a+b)/2$ ,  $a$  为椭圆半长轴,  $b$  为椭圆半短轴。  $\mu$  为介质的刚性模量,  $\varphi = \frac{3-\sigma}{1+\sigma}$ ,  $\sigma$ ——Poisson 比,  $\varepsilon$  为刚性核在其周围介质发生变形过程中被迫转动的角度。

$$\varepsilon = -\frac{pm(1+\varphi)\sin 2\beta}{4\mu(m^2+\varphi)}$$

在上面及今后的公式中,  $\overline{(\quad)}$  均表示  $(\quad)$  的共轭值。垂直于板面方向的应变

$$e_z = -\frac{\sigma}{E}(N_1 + N_2)$$

其中  $E$  为弹性模量。

在数值计算时将上述诸公式无量纲化是方便的,此时计算公式将变为:

$$\begin{aligned} n_1 + n_2 &= 2[\Phi_0(z_0) + \overline{\Phi_0(z_0)}], \\ -(n_1 - n_2)e^{-2i\alpha} &= 2[\bar{z}_0\Phi'_0(z_0) + \Psi_0(z_0)] \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} n_1 &= N_1/p, \\ n_2 &= N_2/p \\ \Phi_0(z_0) &= \varphi'_0(z_0) \\ \Psi_0(z_0) &= \psi'_0(z_0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varphi_0(\zeta) &= \varphi(\zeta)/pl \\ \phi_0(\zeta) &= \phi(\zeta)/pl, \\ z_0 &= r(\zeta + m\bar{\zeta}) \\ r &= R/l\end{aligned}$$

另外

$$\begin{aligned}\varphi_0(\zeta) &= -\frac{1}{4} r\zeta + \left(2\mu_0 m \varepsilon i - \frac{m}{4} + \frac{1}{2} e^{2i\beta}\right) \frac{r}{\varphi\zeta} \\ \phi_0(\zeta) &= \frac{r}{2} \zeta e^{-2i\beta} + 2\mu_0 \varepsilon r \frac{i}{\zeta} + \frac{r}{4} \left(\frac{(1+m^2)\zeta}{\zeta^2 - m} - \frac{\varphi}{\zeta}\right) \\ &\quad + \left(2\mu_0 m \varepsilon i - \frac{m}{4} + \frac{1}{2} e^{2i\beta}\right) \frac{1+m\zeta^2}{\zeta^2 - m} \frac{r}{\varphi\zeta} \\ \varepsilon &= -\frac{m(1+\varphi)\sin 2\beta}{4\mu_0(m^2 + \varphi)} \\ e_z &= -\frac{\sigma}{e} (n_1 + n_2)\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}\mu_0 &= \mu/p \\ e &= E/p\end{aligned}$$

具体计算时的拟合椭圆画在图 3 中，太平洋板块向欧亚板块俯冲产生的水平挤压力近东西向，将具体选定为北东 70°。此时， $\beta = 138.5^\circ$ 。另外，取  $l = 40\text{km}$ ， $\sigma = 0.25$ ， $\mu_0 = 3.56$ ， $a = 9l$ ， $b = 6l$ ，对应的  $m = 1/5$ ， $\varphi = 2.2$ ， $r = 1.875$ ， $e = 8.9$

图 2 给出了主压应力方位角的理论计算值与断层面解作出的结果的对比情况。图中

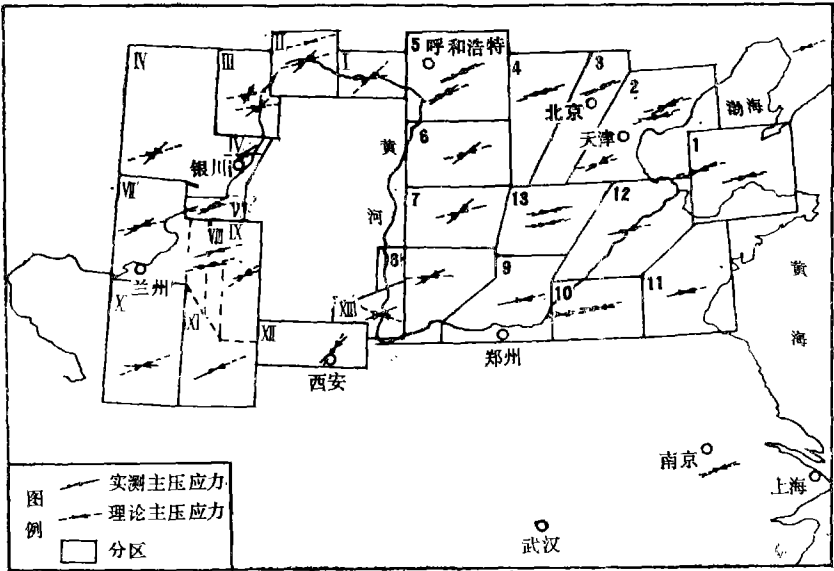


图 2 主压应力方位角的理论计算结果与断层面解给出结果的比较

Fig. 2 Comparison of results calculated for the azimuth of the principal compressive stress with results obtained from fault plane solution

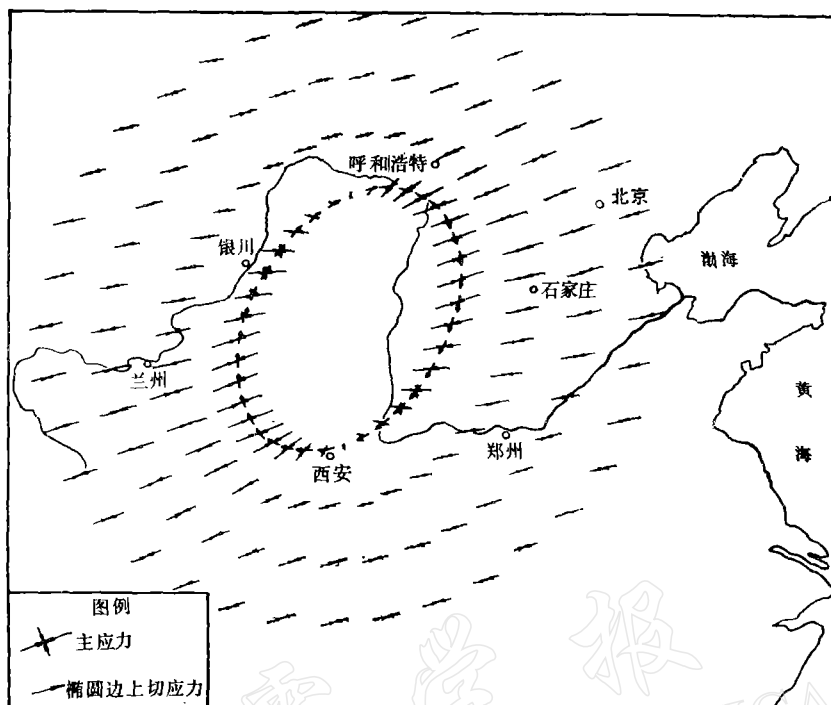


图 3 鄂尔多斯地块周围无量纲平面应力的计算结果

Fig. 3 Results calculated for non-dimensional plane stress around the Eerduosi block

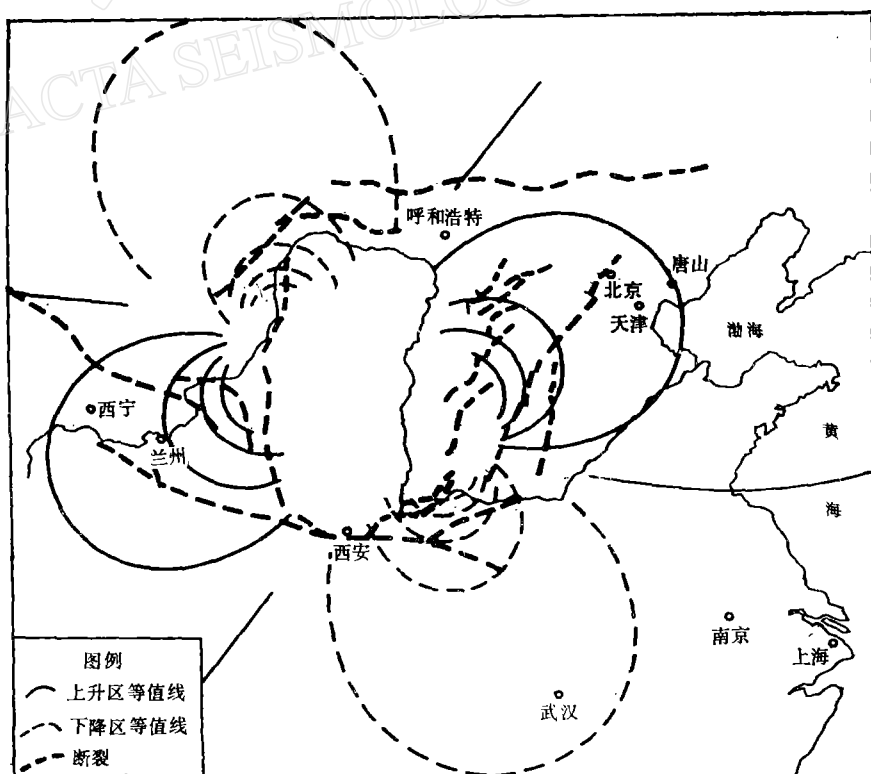


图 4 垂直于板面方向的无量纲正应变的理论分析

Fig. 4 Theoretical distribution of the non-dimensional strain which is normal to the surface of the plate

实线为断层面解,虚线为模型计算结果.断层面解资料取自李钦祖等<sup>[2]</sup>、许忠准等<sup>[3]</sup>以及薛宏运和鄯家全<sup>[4]</sup>.由图可见,模型与实测结果符合较好.

图3是理论平面应力场分布图.各点的应力图示中力线的方位即应力的方位,力线的长短表示与远场应力的比值,当比值为1时的线段长短示于该图中.在拟合椭圆的周边上还画出了切向剪应力,其它各点仅图示出主压应力和主张应力.

图4给出了垂直于板面方向的正应变的模型值.由于这个正应变可以近似代表高程,所以该图可以看作是理论高程分布图.从这个图可以看出,它给出了鄂尔多斯地块周围的东南和西北角沉降,东北和西南角升高的基本形变特征.当然,由于文中的模型是一个非常简单的理想化模型,所以在真实情况下它必将为鄂尔多斯地块以外广大区域的非弹性和非均质性所歪曲.

虽然本文提出的仅是一个相当粗糙的力学模型,但是仍然可以看出鄂尔多斯地块周围的应力场与华北地区的应力场在成因上有密切联系,它们似乎是在同一个力源作用下形成的.鄂尔多斯地块周围地壳应力场与华北地区地壳应力场存在着明显差异的原因大概主要是完整性好的鄂尔多斯稳定地块存在所引起的介质非均一性.这些粗浅研究对于深化板内应力场与形变场的研究可能是有借鉴作用的.

作者对于丁国瑜、许忠淮两位同志对本文提出的宝贵意见,表示衷心感谢.

### 参 考 文 献

- [1] 鄯家全、时振梁、汪素云、环文林,中国及邻区现代构造应力场的区域特征,地震学报, **1**, 9—24, 1979.
- [2] 李钦祖、靳雅敏、于新昌,华北地区的震源机制与地壳应力场,地震学报, **4**, 55—67, 1982.
- [3] 许忠准、阎明、赵仲和,由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向,地震学报, **5**, 268—279, 1983.
- [4] 薛宏运、鄯家全,鄂尔多斯地块周围的现代地壳应力场,地球物理学报, **27**, 144—152, 1984.
- [5] Мухелишвили, Н. И. 数学弹性力学的几个基本问题,科学出版社, 1958.

## THE CRUSTAL STRESS FIELD AROUND THE EERDUOSI BLOCK—A SIMPLIFIED MECHANICAL MODEL

NIU ZHIREN AND ZHANG YI

(*Seismological Bureau of Shaanxi Province*)

### Abstract

In this paper, a simplified mechanical model for the crustal stress field around the Eerduosi block is provided. The Eurasian plate is simplified as an infinite, thin Hooke plate. The relatively stable and integrate Eerduosi block is modeled as a rigid elliptic inclusion embeded in the plate. Due to collision with the Indian Ocean plate and underthrust of the Pacific Ocean plate, the Eurasian plate is compressed in the direction of the westward underthrust of the Pacific Ocean plate. Using Muskhelishvili's solution for this problem, the crustal stress field around the Eerduosi block is analysed and calculated, and a possible explanation is provided for the character of the crustal stress field around the block. The crustal stress field of North China may be formed by the same source of force as the crustal stress field around the Eerduosi block, and a small regional stress field that exists around the block possibly reflects the important inhomogeneity of the medium.