

青藏高原构造变形与热应力场

王连捷 崔军文 王 薇

摘要：自新生代以来，青藏高原构造变形的特点表现为强烈的SN向挤压、逆冲、推覆构造，在后期出现伸展拉张构造。这些构造的形成除了与印度板块推挤有关外，尚与地壳深部温度变化引起的热应力有关。该文计算了由于地壳温度升高引起的热应力场及位移场，指出热应力场及位移场的基本特点，分析了他们在青藏高原构造变形中的作用。考虑到印度板块的推挤、重力和热应力场的共同作用，可以较好地解释青藏高原构造变形的特点及动力学机制。

关键词：青藏高原；构造变形；热应力；地应力场

分类号：P542，TU452

文献标识码：A

TECTONIC DEFORMATION AND THERMAL STRESS FIELD IN QINGHAI-TIBET PLATEAU

WANG Lian-jie¹, CUI Jun-wen², WANG Wei¹

(1. *Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China;*

2. *Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China)*

Abstract: The tectonic deformation in Qinghai-Tibet plateau displays strong compression, shortening and thrust in South-North direction since Cenozoic. During the compression and shortening, extensional structure is developed in Qinghai-Tibet plateau. For the purpose of understanding formation extensional structure in compression environment, thermal stress field and displacement field by temperature rising is calculated in crust. The feature of thermal stress field is described. A rising in temperature in lithosphere may cause very substantial tensile stress in shallow and compression stress in deep crust. Considering stress field caused by combined effect of northward push from Indian plate, gravity and thermal stress, tectonic deformation features in Qinghai-Tibet plateau can be understood better.

Key words: Qinghai-Tibet plateau; tectonic deformation; thermal stress; crustal stress field

0 引言

地壳内温度的变化可以引起应力场的变化。当地壳内温度升高时，有两方面的原因引起应力场的变化：一是密度降低，均衡浮力引起的应力场；二是由于热膨胀而引起热应力。青藏高原自新生代以来，随着地壳的缩短增厚，伴随地幔上隆，局部熔融和温度增高^[1]。高原的构造特点表现为强烈的SN向挤压、逆冲、推覆和走滑构造。在后

期出现伸展拉张构造。

青藏高原的伸展构造主要由正断层和地堑组成，可分为走向SN和走向EW的伸展构造。低角度的构造带主要出现在喜马拉雅构造带的北部和冈底斯—念青唐古拉构造带。高角度的正断层伸展构造主要有中昆仑正断裂、南昆仑正断裂、沱沱河金沙江正断裂、班公湖-澜沧江正断裂和雅鲁藏布江正断裂。这些构造带的形成除了与印度板块的挤压有关外，尚与地幔上拱、岩浆侵入、局部熔融等引起的热应力有关。为此，本文用有限元法计算了地壳温度升高引起的热应力及其在高原变形动力中的作用。

1 热应力场的一般分析

1.1 本构方程

假定地壳为弹性体，在平面问题中，温度是坐标x和y的函数。当温度变化为t，地壳岩体内各点的微小长度如果不受任何约束将发生正应变 ϵ_t ，此处 α 为膨胀系数。在各向同性材料中，此正应变在各个方向上都相同，且没有剪应变。但是地壳内岩体受到约束以及地壳内各部分之间的相互制约，上述变形并不能自由发生，这就引起变温应力。

在平面应变状态下，变温应力的本构方程为[2]：

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{1-\mu^2}{E} \left(\sigma_x - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_y \right) + (1+\mu)\alpha t \\ \epsilon_y &= \frac{1-\mu^2}{E} \left(\sigma_y - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_x \right) + (1+\mu)\alpha t \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\frac{\mu}{1-\mu})}{\frac{E}{1-\mu^2}} \tau_{xy}\end{aligned}$$

式中 $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 为正应变和剪应变； $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 为正应力和剪应力； α 为膨胀系数；t为温度变化。

1.2 边界条件

地质模型为均匀地质体，南北方向长度取480km，深度100km，模型两侧水平方向为弹性约束，铅直方向自由。底部边界在水平方向为自由，铅直方向约束。温度分布为两种情况：一为板状温度分布，一为透镜体状温度分布。前者可与地壳内拆离层相比拟，后者可与地幔底辟、Moho面局部上拱相比拟。

1.3 计算结果

1.3.1 板状温度升高的情况 板状温度分布如图1。温度随深度增加，温度梯度为5 / km。

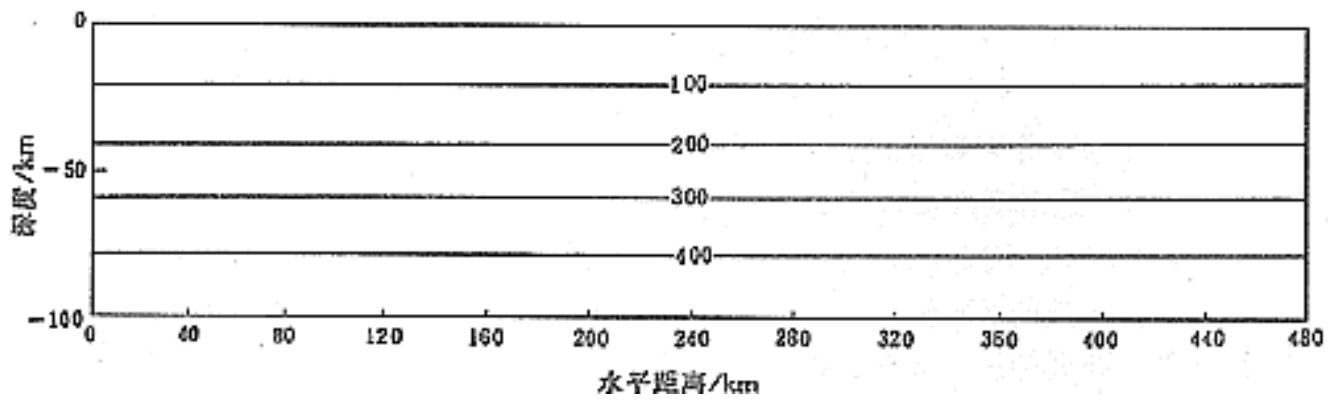


图1 地壳纵向温度梯度为5 °C/km横向均匀的温度/ °C分布等值线
Fig.1 Distribution of temperature with vertical thermal gradient 5 °C/km

(1)应力场

图2是由图1的温度分布引起的主应力矢量与水平应力等值线；图3为不同温度梯度时应力随深度的变化情况。

由图2及图3可以看出，热应力场的特点是地壳上部为拉应力，下部为压应力；温度梯度愈大，应力数值越大；地表张应力大，深处压应力大。

(2)位移场

图4为位移矢量。可以看出，位移场的特点是向上和向两侧位移。两侧地区水平位移幅度增大，温度梯度和位移幅度也随之增大。当温度梯度为5 °C/km时，地表处最大铅直位移约为0.5km。

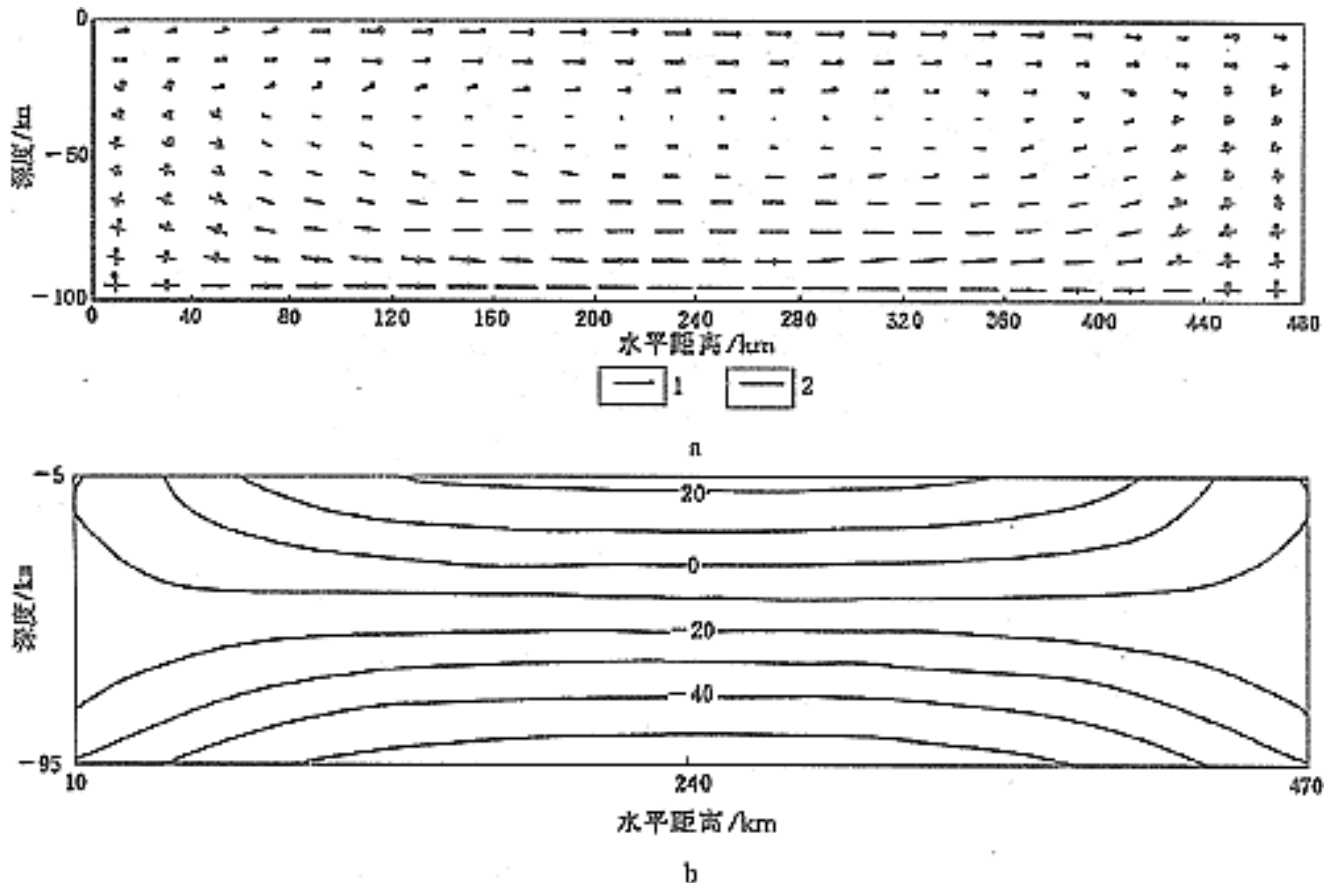


图2 由图1的温度分布引起的应力场

Fig.2 Stress field caused by temperature as Fig.1

a.主应力矢量(1.张应力; 2.压应力); b.水平应力等值线/MPa(负号表示压应力)

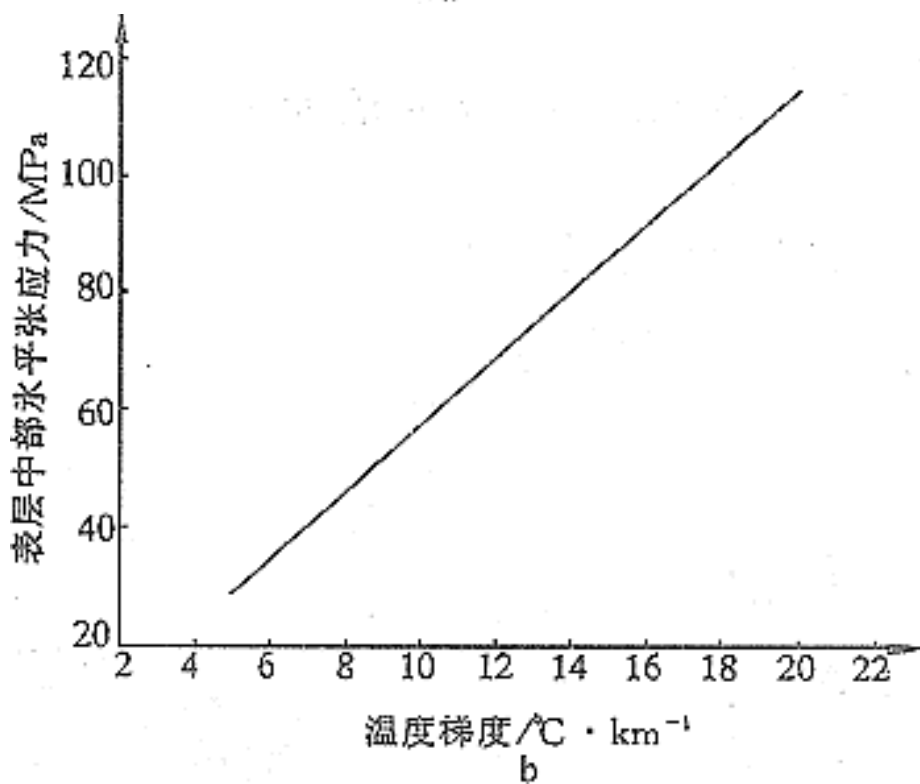
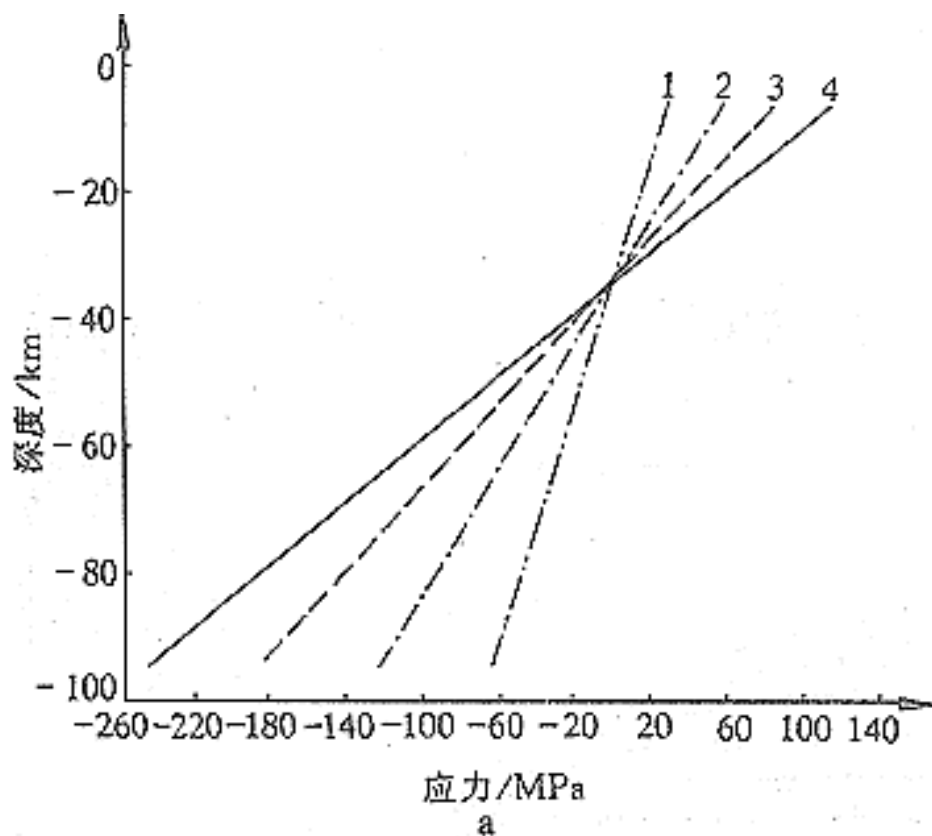


图3 应力随深度和温度的变化

Fig.3 Variation of stress with depth (a) and temperature gradient(b)

a.不同温度梯度时应力随深度的变化；b.表层中部水平张应力与温度梯度的关系
1~4.分别代表温度梯度 $5^{\circ}/\text{km}$ 、 $10^{\circ}/\text{km}$ 、 $15^{\circ}/\text{km}$ 、 $20^{\circ}/\text{km}$

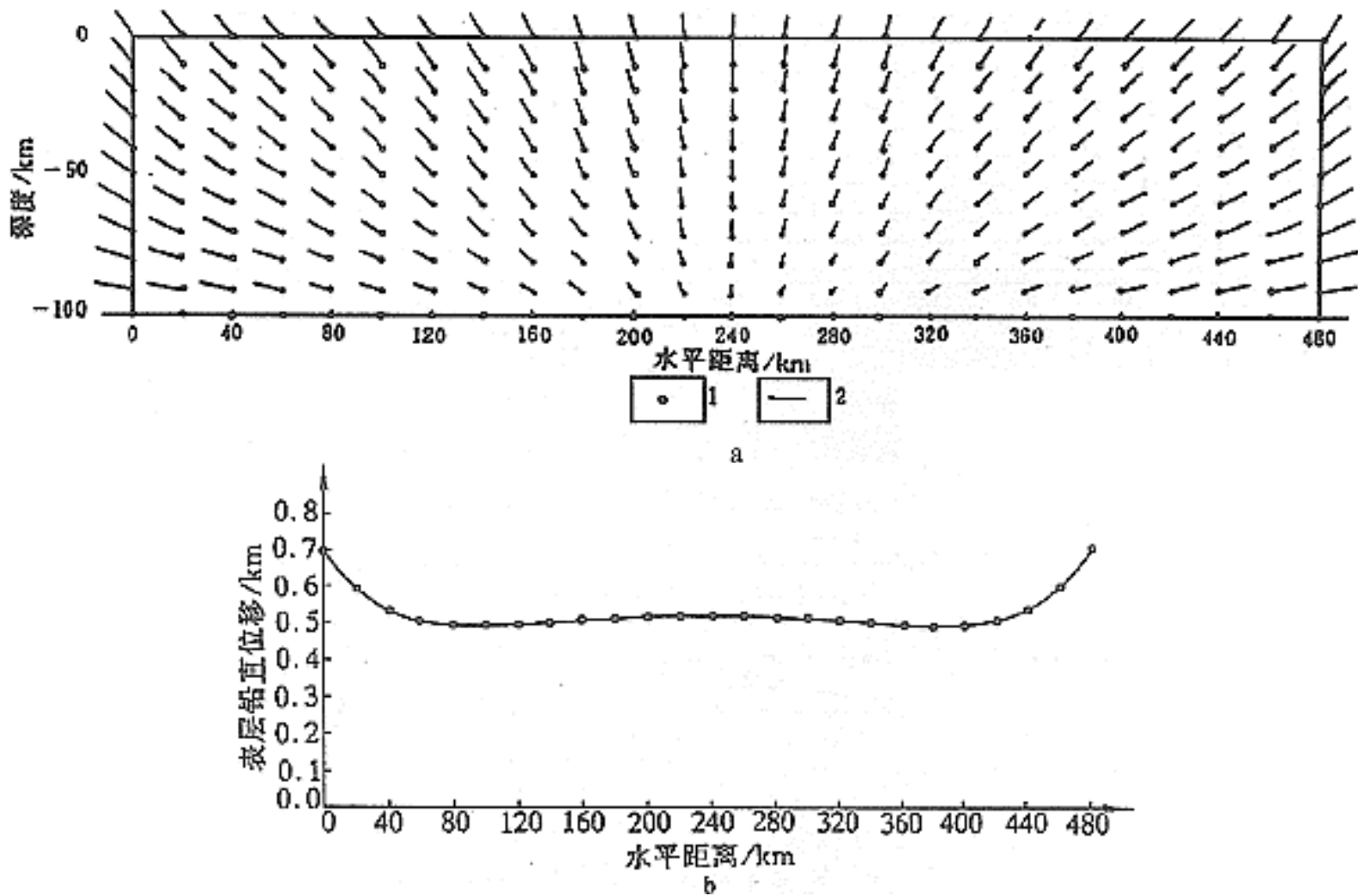


图4 板状温度分布引起的位移场

Fig.4 Displacement field caused by temperature as Fig.1

a.温度梯度为 $5^{\circ}/\text{km}$ 时的位移矢量(1.初始位置；2.位移方向及大小)；b.表层铅直位移曲线

1.3.2 透镜体状温度升高的情况

(1)应力场

图5为局部温度升高的模式。图6为相应的应力场矢量及应力场等值线。可以看出，这种温度分布模式所引起的应力场其特点是表层中部水平拉应力最大，两侧拉应力下降，并转变为小的压应力，深处为水平压应力，且向两侧压应力变小，在中等深度附近应力值最小，在温度隆升的两侧，主应力变为倾斜的。

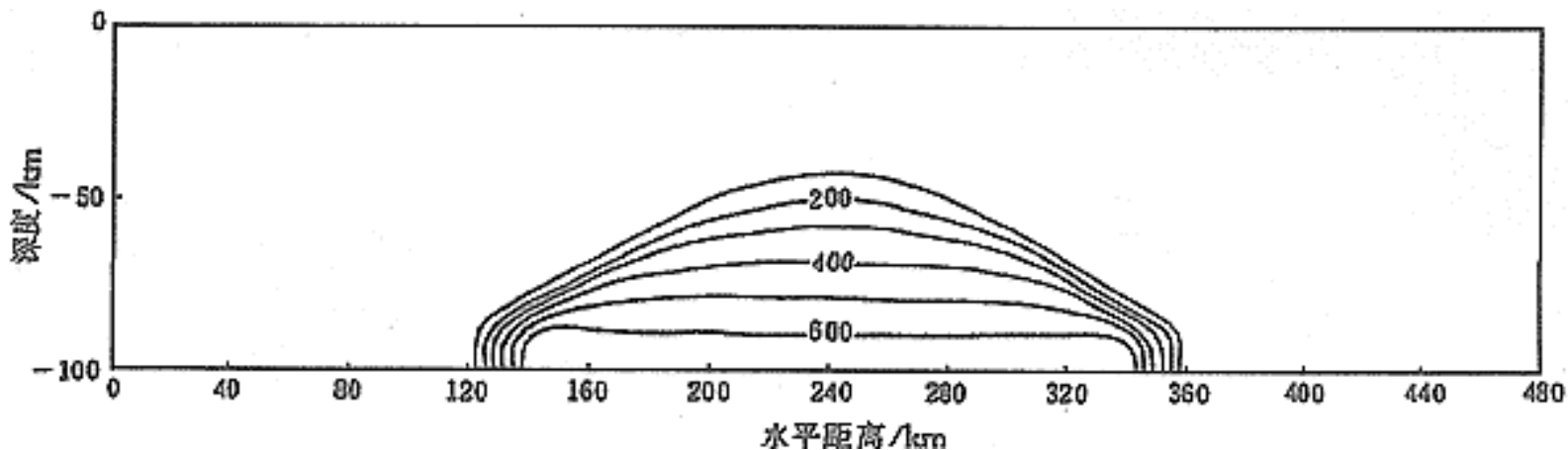


图5 地壳深部透镜体状局部温度/ 升高模式
Fig.5 Showing distribution of temperature in crust

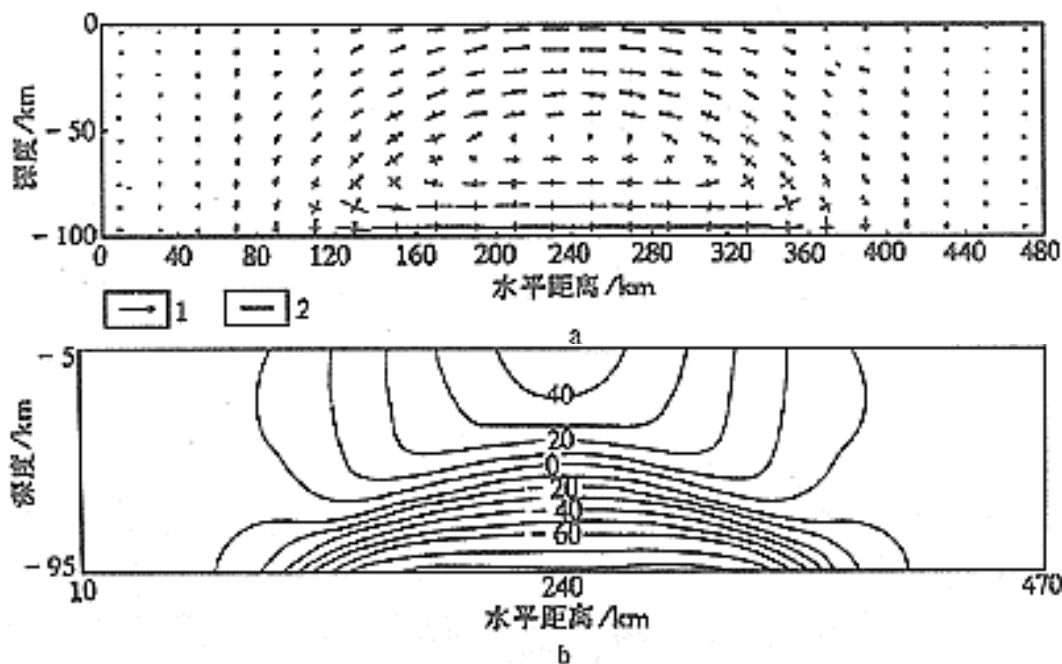


图6 局部温度升高引起的应力场
Fig.6 Stress field caused by temperature as Fig.5
a.主应力分布矢量图：1.张应力；2.压应力；b.水平应力等值线

(2)位移场

局部温度升高引起的位移场特点是由热隆区向上、向两侧位移(图7)，地表铅直位移最大，两侧转为水平位移。温度越高，梯度越大，位移量越大，可达0.4km或更大。

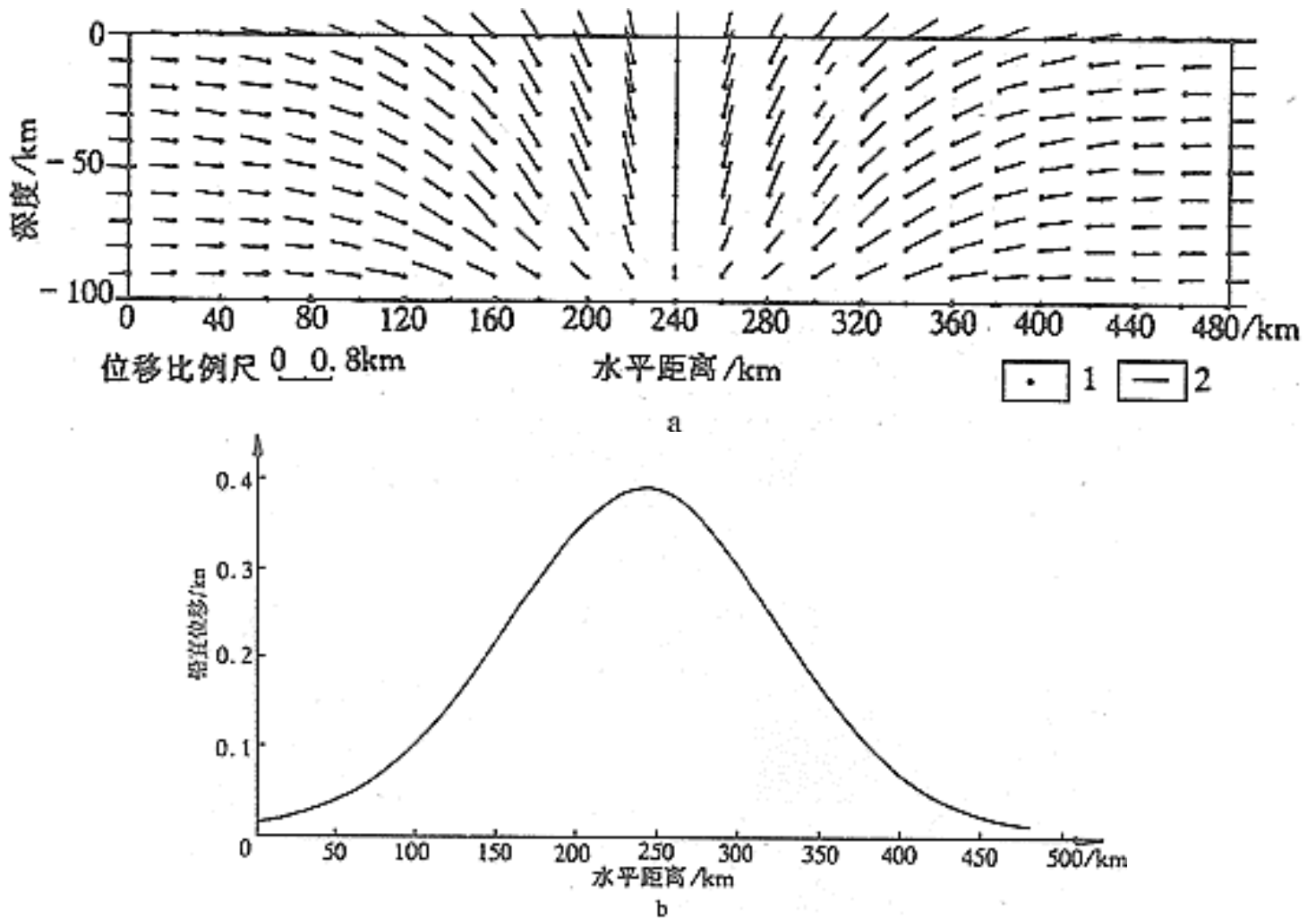


图7 局部温度升高引起的位移场

Fig.7 Displacement field caused by temperature as Fig.5
a.位移场(1.初始位置；2.位移矢量)；b.地表铅直位移

1.4 热应力场的主要特点

根据计算结果，地壳中热应力场的主要特点归纳如下：

(1)地幔上拱，局部熔融，岩浆侵入等活动会引起温度升高而引起地壳中的热应力，使岩石圈的应力场和位移场改变，造成应力场的不均匀性。

(2)地壳深处温度升高时，应力场的特点表现为地壳上部出现水平向拉张应力，下部出现水平向压应力，温度梯度越大，张应力和压应力值越大。这种张应力可以引起拉伸构造。

(3)温度升高区的上方地表处拉应力最大，向两侧迅速下降，并转变为压应力。

(4)位移场的特点是向上和向两侧扩展，温度梯度越大，位移量越大。温度梯度为 5 /km时，最大铅直位移可达0.5km，向两侧的位移量约0.7km。温度升高区的正上方地表处铅直位移最大，向两侧铅直位移减小。

(5)热应力场和位移场的特点与青藏高原深层扩展模式有较好的对应关系。

另外，地壳深处温度变化可以引起岩石密度变化，从而引起地壳应力变化。Boot M.H.P. [3] 计算了高原地区上地幔的密度变化在上地壳10km~20km深度范围内引起的水平向张应力，指出这种应力可以达到20MPa或更大，可以引起上地壳开裂。

2 热应力场在青藏高原构造变形中的作用

根据热应力场的特点,对照地质构造图,我们可以分析青藏高原的变形机制。为了更具体的研究高原构造变形机制,我们根据沈显杰提供的青藏高原的温度分布剖面[4],计算了高原的热应力场,并将热应力场与印度板块向北的推挤力和重力应力场进行叠加,得出这些因素联合作用下自亚东至北祁连剖面的应力场。叠加后的应力场,在上地壳表层的一些地区出现拉伸构造应力场,另一些地区出现挤压构造应力场[5]。青藏高原在印度板块推挤作用下,总体上在SN向挤压环境中出现了拉伸构造。这种应力场的分布与实际构造现象有较好的对应关系,能较好的解释青藏高原构造现象和高原的变形动力机制。

基金项目:原地质矿产部“八五”重点地质科技研究项目——“青藏高原北缘变形动力学研究”的第四课题。

作者简介:王连捷(1933—),男,研究员,从事地应力测量与构造应力场的数值分析及其在地球动力学和工程稳定性评价中的应用研究。

作者单位:王连捷 王 薇 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
崔军文 中国地质科学院地质所, 北京 100037

参考文献

- [1] 崔军文,朱红,武长得,等.青藏高原岩石圈变形及其动力学[M].北京:地质出版社,1992.
- [2] 华东水利学院.弹性力学有限元法[M].北京:水利电力出版社,1974.
- [3] Boot M H P et al.. Stress distributions associated with compensated plateau uplift structures with application to the continental splitting mechanism [J]. J.G.R.1979,56: 451 ~ 459.
- [4] 沈显杰.从青藏高原热流的形成机理推论西藏地壳和上地幔热结构[J].地球物理学报,1985,28(增刊1).
- [5] 王连捷,崔军文,武红岭,等.青藏高原北缘岩石圈构造应力场[M].北京:冶金出版社,1998.

收稿日期:1999-07-20