

青藏高原的隆升缩短及其粘弹性形变分析

武红岭 王 薇 王连捷 张利容

(中国地质科学院地质力学研究所)

崔军文

(中国地质科学院岩石圈中心)

摘 要 本文依据新生代以来喜马拉雅和青藏高原发生的强烈的构造形变特征,用二维粘弹性有限元数值方法模拟估算了在印度板块向北推挤欧亚大陆的动力条件下,高原各构造单元的形变速率以及由此推算出40Ma以来青藏高原的隆升量和缩短量。反演了各地体岩石力学参数,特别是有效粘性系数 η 的数量级。认识到物性参数对构造应力场和形变速率的极重要的影响作用。阐明了除了动力机制和边界条件外,岩石圈各圈层材料力学性质的不均一是造成位移场、应力场和形变速率的差异,从而引起各种复杂地质构造现象的基本因素之一。

关键词 青藏高原 构造形变 流变性 粘弹性

0 引言

80年代以来,中外地球科学家相继开展了青藏高原构造变形动力学模型的数值研究工作。其中涉及到粘性或粘弹性模型的主要有 England 和 Mckenzie 提供了一个薄粘性壳模型^[1],大陆岩石圈被视为连续的、遵从牛顿流体或非线性幂次定律的流变介质在一个非粘性基底上的薄壳流动问题。王其允、石耀霖用重力异常和抬升速率的数据作为对二维纵剖面模型的限制条件^[2],采用非线性粘性流体的有限元模拟方法,研究了青藏高原隆升缩短的形变特征。Vilotta 等将岩石圈视为均匀的非线性刚粘性介质^[3],分别讨论了平面应力和平面应变两种情况下的形变规律。Loo 和 Kong 用牛顿流介质模型^[4],建立了青藏高原地壳厚度差异对构造活动影响的三维模型。

本文将在前人工作的基础上,依据地质的、地球物理的最新实际资料,选择一个典型剖面,针对青藏高原岩石圈形变的流变特征,进行粘弹性地质体的有限元形变分析。并根据高原隆升缩短增厚的平均形变速率,反演边界力的量级以及岩石力学参数,特别是粘性系数的数量级。模拟青藏高原的形变特征及其动力成因。

1 粘弹性模型的力学性质

地质体的形变特征不仅取决于施加的力的大小和作用方式,同时取决于边界状况和岩石

的物理力学性质。即：岩石自身对外力的响应程度。众多的观察事实表明，青藏高原自新生代以来发生了强烈的形变和急剧的隆升、缩短、增厚。岩石圈，特别是中下地壳的构造形变具有明显的流变特征。因而采用流变模型是合理且适用的。

粘弹性模型的类型很多，它们的特性是强调了时间因素，其总形变是由弹性元件和粘性元件相互作用的结果。在本模型的计算中，我们选用了最具代表性的 Maxwell 体模型，它被视为适用于岩石圈形变特征的基本模型之一。

在一维情况下，Maxwell 模型可用一个弹性元件(弹簧)和粘性元件(阻尼器)串联表示(图 1)。其中 E 为弹簧弹性模量， η 为阻尼器的粘性系数。在应力 σ 的作用下，总应变为弹性形变 ϵ^e 与粘性形变 ϵ^v 之和： $\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^v$ 。同样，应变率 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^v$ ，弹性体的应力应变关系 $\dot{\epsilon}^e = \dot{\sigma}/E$ ，而粘性体 $\dot{\epsilon}^v = \sigma/\eta$ ，为此， $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}/E + \sigma/\eta$ 。

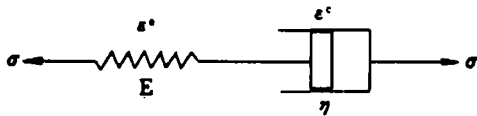


图 1 Maxwell 粘弹性体模型

Fig. 1 The model of Maxwell visco-elastic material

如果在 $t=0$ 时突然施加一个轴向应力 σ ，然后保持初始形变不变。开始时阻尼器来不及形变，形变是完全弹性的，然后随着时间的变化，粘性元件将逐渐变形，由于总应变不随时间改变，弹性变形部分就逐渐减少，相应的应力下降，最终趋于零。这就是应力松弛现象。如果在突然施加应力之后，保持 σ 不变，那么瞬时的形变是弹性的，但随着时间的增长，粘性元件开始起作用，由于应力不变，粘性形变将逐渐增大，总应变(二者

之和)自然随粘性应变的增加而加大，这就是蠕变现象。

这种模型用于分析地壳中十分缓慢的永久变形过程是适宜的，也能用于代表地幔中的物质。当应力变化迅速的时候，如地震及地震波的传播，它的反应是弹性的，能够传播剪切波，而在应力的持续作用下，它又象粘性流体似的不断变形。只要超过基本强度，不论应力是大是小，都具有持续的永久变形的特征，而且只要时间足够长，形变的积累就能达到可观的程度。它本质上是一种流体，被称为马克斯威尔粘弹性体。在计算中，青藏高原的南缘边界施加了向北的推挤力，并保持这个边界力的大小不变，以模拟青藏高原随时间变化的横向缩短和纵向抬升、加厚。

2 模拟计算的思路 and 实现方法

由于地质年代的久远，对青藏高原新生代的总体几何特征了解甚少。想要追溯它的历史发展演化进程，我们可以用现今掌握的资料和已知的数据、现今的地貌几何特征，通过分析演算，去追寻那些时间和空间上的未知量。

具体做法，选择一个地学剖面，贯穿青藏高原南北，按照现今的大地构造特征和较为公认的分层模式，将剖面划分为计算单元，不同层和构造单元选择不同的岩石物理力学参数。南边界施加推挤力，通过有限元计算，解出各节点和单元的初始弹性位移、应力、应变，然后进行单位时间的粘性计算，找出以上物理量随时间的改变量。考虑到岩石圈长度，厚度不同会引起的位移量的差异，为避免不确定性，我们将重点分析各地体的无量纲量——应变率的差异，从而推算出高原各地块的年形变量和速率(包括横向缩短和纵向隆升)，然后与现有的大地测量资料(形变率，隆升幅度，缩短量)对比，如果不符，就反复调整各圈层材料的粘性参数，直至计算

结果与实际观测数据相符。由于粘弹模型是线性模型,形变量随时间增长,使得我们能够从计算所得各地体的应变速率,推算出 40Ma 乃至更久远地质时期以来,青藏高原各地体的缩短量和增厚量及其初始位置。

3 模型选择

由本项目之前和现阶段的研究成果,提供了现今亚东—格尔木地学断面的较完整的岩石圈结构形态,各较大断裂的确切位置以及大体上的速度分层。为了研究青藏高原总体上的形变特征,没有顾及更多的细节。因而选取了一个示意性的剖面作为计算模型,网格的划分比较粗略。根据两个重要的低速带和上、中、下地壳以及各大地体间的界限将整个区域分为 105 个单元,128 个节点,南北长度为 1150km,平均深度 67.4km,各地体地壳厚度由地表到下地壳底界深度确定,模型下界为 85km(图 2)。各地体间的界限、高程及低速带的位置根据文献[5]确定。各圈层的物理力学参数参考前人取值又经反复调整反演确定(表 1)。

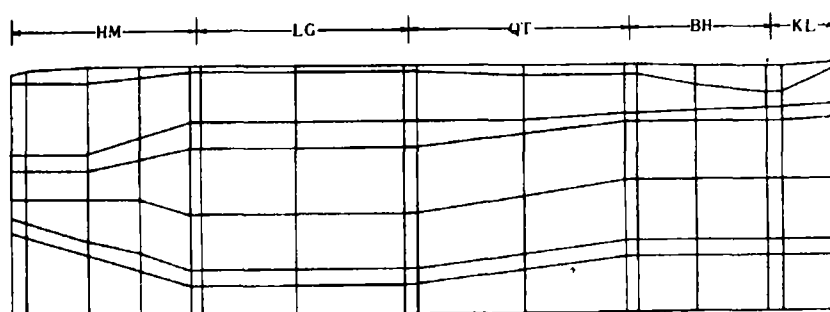


图 2 青藏高原岩石圈结构、构造的模型网格图(纵横比 1:4)

Fig. 2 The tectonic model of lithosphere in Tibetan Plateau for Finite Element calculation (Vertical—horizontal scale 1:4)

HM. 喜马拉雅地体; LG. 拉萨冈底斯地体; QT. 羌塘地体; BH. 巴颜喀拉地体; KL. 南北昆仑地体

(图 3、图 4、图 5、图 6、图 7 图注同图 2)

表 1 岩石圈内各材料参数表

Table 1 The material property in Lithosphere

编号	分层	弹性模量 E (10^4MPa)	泊松比 ν	密度 ρ (10^{-2}kg/cm^3)	粘性参数 η ($1 \times 10^{22}\text{Pa} \cdot \text{s}$)
1	上地壳	3.4	0.495	2.55	2.27
2	中地壳	4.08	0.4999	2.63	2.50
3	下地壳	4.4	0.4999	3.0	3.27
4	低速层	0.9	0.495	2.55	0.47
5	上地幔	5.5	0.4999	3.35	5.25
6	稳定区	4.7	0.495	2.55	4.75

南缘边界向北的推挤力定为 90MPa。对于粘性计算来说,关键在于粘性参数的选取。有效粘性系数参考文献[2]平均数量级取为 $1 \times 10^{22}\text{Pa} \cdot \text{s}$,具体调整时考虑了温度的影响作用。根

据原先的推算考虑到高原地表各地体抬升比较均一(40Ma 平均升高 15—20km)^[5],在南缘、北缘均没限制垂向的位移,但在北缘假定水平向位移为零,以此模拟北缘对青藏高原北进的阻挡作用,底部边界约束了垂向位移,水平向自由。此外还施加了一定的体积力模拟重力的均衡作用。

4 结果分析与讨论

4.1 各地体运动速率、应变率分析

青藏高原受到印度板块推挤和北缘边界阻挡后的位移速率矢量如图 3。由于粘性形变在一个单位时间段(秒)内的变化量与初始的弹性形变量相比差了十几个数量级,因而本图表现的主要是弹性位移的方向和大小。但由于粘性模型的形变随时间线性增加,本图仍能够反映总体上的位移趋势。图中各点的位移以向北为主,同时上部边界(地表)有明显上升趋势。

青藏高原各地体的粘性水平位移速率从南向北逐渐减少(图4)。当高原南北向长度为

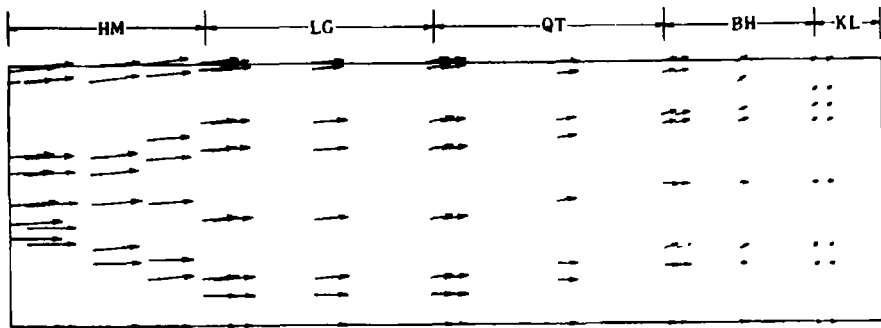


图 3 青藏高原北向位移示意图(初始)

Fig. 3 Sketch map of displacement northward ($t=0$) in Tibetan plateau

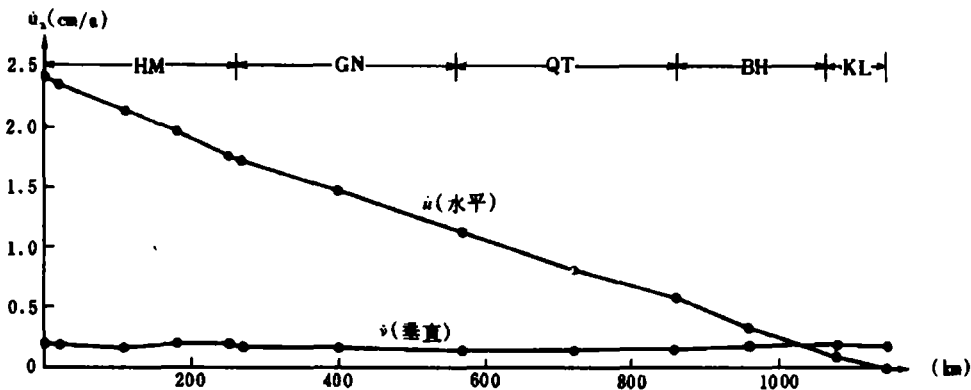


图 4 青藏高原各地体粘性位移速率

Fig. 4 The motion velocity of various terranes in Tibetan plateau

1150km,假设昆仑地块北端速率为零时,喜马拉雅地体南缘碰撞带的年位移量大约 2.5cm/a。如果认为 40Ma 时地体长度是现今的两倍,可推算出南缘碰撞带运动速率为 5cm/a,与野外观测

数据相符合。垂向抬升比较均匀,约 0.1—0.2cm/a 之间。平均为 0.18cm/a,接近文献[2] 0.2cm/a 的抬升速率。高原两端抬升速率略高于内部。

由于位移速率受模型几何特征(长度、厚度)的影响,它只具有相对意义,不反映形变本质。因此,我们主要分析无量纲物理量——应变率,并以此推算 40Ma 以来各地体的缩短量和增厚量。

青藏高原各地体初始 $t=0$ 时的应变为弹性应变。随后,各地体的应变随时间不断增大(图 5)。由于材料形变遵从不可压缩牛顿流的本构方程,加上平面应变的假定使得应变率有如下关系, $\dot{\epsilon}_x = -\dot{\epsilon}_y$, 纵向应变率与横向相等,但符号相反(缩短为负,增厚为正),所以图中曲线纵向应变率同时可代表横向。图中沿计算剖面各点的量值是图 1 中各纵列 8 个计算单元的算术平均值。从图中可看出从南至北应变率曲线呈盆状。喜马拉雅地体的应变率较大,大约每百万年平均缩短、增厚 2.36%。巴颜、昆仑稍次之,每百万年 2.27%,中部约 1.94%。上述应变率的详细计算结果以及由此推算出的各地体 40Ma 以来缩短增厚量列于表 2。

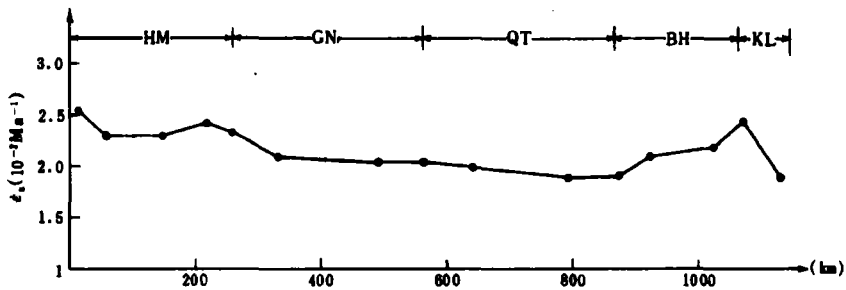


图 5 青藏高原各地体粘性应变率

Fig. 5 The viscous strain rate of various terranes in Tibetan plateau

表 2 青藏高原各地体几何特征变化表

Table 2 Variation of geometric feature of the terranes in Tibetan plateau

地体名称	地体长度(km)			缩短 (%)	地壳平均厚度(km)			增厚 (%)	应变率 $\dot{\epsilon}$	
	0Ma	40Ma	缩短		0Ma	40Ma	增厚		10 ⁻² Ma ⁻¹	10 ⁻¹⁵ Ma ⁻¹
HM	260	476	416	62	56	22	34	154	2.36	0.749
LG	300	698	398	57	75	33	42	128	2.08	0.660
QT	310	683	373	55	75	35	40	115	1.94	0.616
BH	200	500	300	60	66	27	39	146	2.27	0.722
KL	80	170	90	53	65	31	34	108	1.87	0.593
总计及 平均值	1150	2727	1577	57	67	30	37	130	2.10	0.663

由喜马拉雅地体 $0.75 \times 10^{15} \text{s}^{-1}$ 的应变率推算出 40Ma 地体从原来长 676km 缩短了约 62%, 416km, 到现在的 260km; 地壳厚度由原来 22km 增加到 56km, 增厚了 154% 约 34km。高原南北向 40Ma 时总体长度 2727km, 缩短至现今的 1150km, 平均缩短了 57%, 约 1577km; 地壳厚度由平均 30km 增加到 67km, 增厚了 130% 约 37km。青藏高原整体平均应变率 $0.66 \times 10^{-15} \text{s}^{-1}$ (表 2)。略低于文献[1]、[2]、[3]采用的应变率 ($1 \times 10^{-15} \text{s}^{-1}$)。所得高原增厚量略大于

本专题限定的实测值,但量级一致。造成上述差异的原因可能与模型采用的平面应变假设有关。由于假定不允许有东西方向的水平位移,使得满足不可压缩牛顿流假定的物质流只能沿南北向压缩和抬升方向运动,增厚量偏大就难免了。实际观测表明,青藏高原东西向的水平运动是不容忽视的。如果仍进行平面计算,可能用平面应力的假定结果会好一些。

总的来看,我们的数值模拟、模型、形变率的计算和隆升缩短的推断在整体上与实际资料数据的量级关系基本吻合,对研究青藏高原的演化历史有一定的参考意义。

4.2 各地体应力状态分析

青藏高原在受到南北向挤压力作用时,水平向缩短,垂向增厚。将图 6 的主应力大小和方向与图 2 的岩石圈结构、构造相对照,可以清楚地看到,结构、构造对应力的影响作用。在各地体内部,岩石刚性较强,水平向主要承受较大的挤压力。而垂向膨胀和物质不均匀导致沿铅垂方向较小的压应力或拉应力(图中划圈方向为拉张方向),同时受到较大的剪应力。比较而言,南北两端地体的剪应力梯度较大,应力变化较强烈(图 7)。而高原内部较稳定。以上两图还表

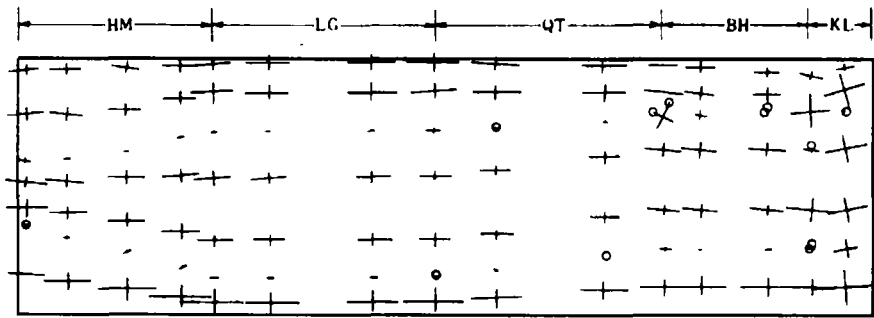


图 6 青藏高原主应力大小、方向示意图

Fig. 6 Sketch map of principal stress directions and magnitude in Tibetan plateau

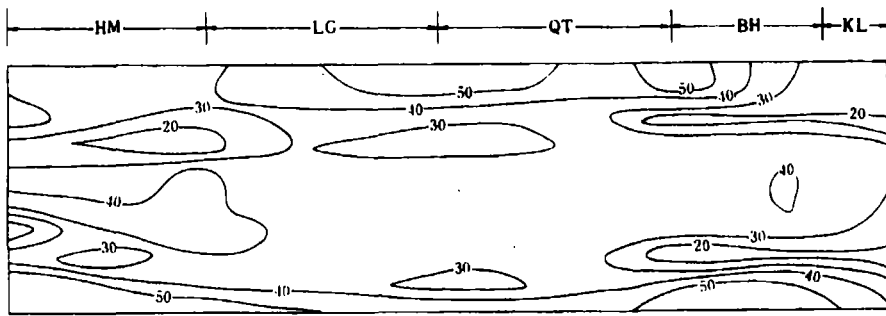


图 7 青藏高原最大剪应力等值线图

Fig. 7 Contours of maximum shear stress in Tibetan plateau

明岩石圈内部低速层的存在干扰了应力场的均一状态。低速层内应力平均水平低,差应力也较小,更接近于静岩压力状态。这是由于它们的岩性比较软弱,在受力后容易形变,承受剪切力的能力低,因而它们的差应力(或最大剪应力)较小。由于材料性质不均匀造成的应力集中处的应力大于边界上施加力的 2—3 倍。

在万年量级内,青藏高原各地体最大剪应力有随时间衰减的趋势(图 8),这就是应力松弛

现象。用粘性系数估计的松弛时间大约为 0.054Ma。就是说在经历了 0.054Ma 之后,初始弹性应力将降至它的 $1/e$,约等于它的 0.368 倍。由于岩性的差异,应力的松弛规律不同。图中 1 号曲线描述了喜马拉雅地体下地壳某点的应力衰减情况。比较而言衰减的最慢,5 千年之后,衰减了原应力的 3.4%,而且衰减不呈线性。其次是昆仑(2 号),冈底斯(3 号),羌塘(4 号)地体,衰减程度比较接近,而且趋近于线性。5 号曲线表明断裂带、低速带的剪应力衰减最快。5 千年左右衰减了大约 10%,说明软弱带有可能最先趋于静岩压力状态。图 7 更清晰地反映了岩石圈不同的结构、构造对应力的影响作用,近于水平的速度分层特别是低速层的分布控制了应力的分布状况。正是由于各圈层岩石不同的物理力学性质,使得它们对统一的外力作用做出了不同的响应,引起了其间位移、应变、应力的差异,层间的拆离或滑脱等等复杂的构造现象。

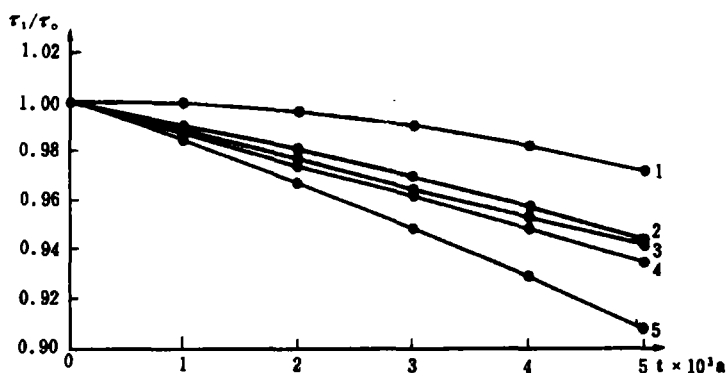


图 8 青藏高原各地体剪应力随时间衰减

Fig. 8 The decay of shear stress with time in Tibetan plateau

5 主要结论和存在问题

通过对青藏高原垂向模型的粘弹性有限元计算分析,我们能够得出以下几点认识。

(1)由现今高原的隆升幅度和缩短的位移速率反演的边界受力方式表明,由印度板块向北俯冲和北部边界的阻碍作用造成的 SN 向水平挤压力是青藏高原岩石圈变形的主导机制。

(2)当水平向挤压力在 100MPa 的量级时,若岩石的粘性参数在 $1 \times 10^{22} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 的量级内适当选取,所得高原平均形变率为 $0.66 \times 10^{-15} \text{s}^{-1}$,相当于高原南缘碰撞带向北的推进速率为 5cm/a 左右,隆升速率为 0.18cm/a。与实测值吻合的很好。

(3)青藏高原岩石圈的主要运动方式是北向水平运动,位移由南往北逐渐减少。由上述应变率推算出青藏高原 40Ma 以来大约缩短 57%,原长 2700km 左右,增厚大约 130%,地壳原来厚度 30km 左右,隆升幅度平均为 37km。应变率随时间线性增长。上述结果在量级上与实测数据资料一致。

(4)在统一的外力作用下(印度板块推挤),高原各地体的隆升幅度不同,是由岩石圈厚度不均一而且各圈层构造带的物性参数不同所引起的。软弱的岩石较之坚硬的原岩,不能抵抗剪应力,而以永久形变的方式耗散了一部分能量,其应力特征是趋向于静岩压力状态,软岩和原岩由于物性不同造成的各地体垂向、横向的形变、应力、位移的差异,引起了地块间、层间复杂的滑脱、拆离等等构造现象。

(5)模拟计算的地壳增厚比实际值大,可解释为平面应变和不可压缩假定的局限性所致。

为此,考虑到青藏高原有 EW 向水平运动,对于平面问题最好用平面应力假设。

(6)粘弹性模型(Maxwell 体)能够较好地代表真实地质体的流变特征,特别是能够模拟形变随时间增加的蠕变现象,我们的计算印证了这点。但 Maxwell 体尚属较简单的线性模型,要更好地模拟真实地质体最好采用幂次非线性流变体模型。

(7)由于受现有研究技术水平的限制,缺乏更详实可靠的实测数据资料,数值模拟结果的参比对象很少。而且动力来源也只计及了印度板块的推力,因此,目前的计算基本上还是定性的,所得的量化仅供参考。

参 考 文 献

- 1 England P. and D. Mckenzie, A thin viscous sheet model for continental deformation, *Geophys. J. R. astr. soc.*, 70, 295-321, 1982.
- 2 Wang Chi-Yun, Y L. Shi and W H. Zhou, On the tectonics of the Himalaya and The Tibet plateau, *J. G. R.*, 87, B4, 2949-2957, 1982.
- 3 J P. Vilotta and M. Daignieres, Numerical modeling of intra-plate deformation; Simple mechanical model of continental collision, *J. G. R.*, 87(B13), 10709-10728, 1982.
- 4 Loo Huan-yen, X H. Kong, Numerical modeling of Qinghai-Xizang plateau formation mechanism. *Proc. Sino-Japanese joint Sci. Symp Tibetan plateau*, Vol. 1, 93-110, 1989.
- 5 崔军文,朱红等,青藏高原岩石圈变形及其动力学。地矿部地质专报,第 17 号,北京:地质出版社,1992。

UPLIFTING AND SHORTENING OF TIBETAN PLATEAU AND VISCO-ELASTIC DEFORMATION ANALYSIS

Wu Hongling Wang Wei Wang Lianjie Zhang Lirong

(*Institute of Geomechanics, CAGS*)

Cui Junwen

(*Center of Lithosphere, CAGS*)

Abstract Based on the strong deformation which has taken place in the Himalayas and the Tibetan plateau caused by the northward push of the Indian plate since Cenozoic, an estimate by simulation is made of the strain rate of each tectonic unit and the consequent amount of uplifting and shortening of the Plateau since 40Ma B. P. using two-dimensional visco-elastic Finite Element Analytic Method. The Mechanical Parameters of rocks of each terrane, especially the order of magnitude of the effective viscous coefficient η are deduced by inversion method. Detail calculation shows that in addition to the dynamic mechanism and boundary condition, the physical property of rocks play an important role in determining the tectonic stress field and strain rate. It is the varied mechanical properties of the different lithospheric layers that lead to the difference in the stress field, displacement field and in the strain rate and resulting complication of geologic structures.

Key words Tibetan plateau, tectonization, rheology, viscoelasticity

第 一 作 者 简 介

武红岭,女,1948年生,副研究员。1977年毕业于北京大学力学系固体力学专业。1983年毕业于北京大学地质系地质力学专业,获硕士学位。主要从事岩石力学构造应力场的数值模拟研究工作。通讯地址:北京海淀区民族学院南路 11 号地质力学研究所。邮政编码:100081。