

文章编号: 1006-6616 (2006) 02-0140-10

青藏高原中段现今构造应力场的数值模拟

王连捷, 吴珍汉, 王 薇, 孙东生

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 将地壳岩石看成粘性流体, 对青藏高原中段进行了构造应力场和速度场的有限元模拟。模拟结果表明: 青藏高原总体向北和向东位移, 向北的位移速度是南部最大, 由南向北逐渐减小; 向东的位移速度以唐古拉断裂附近最大, 南北两侧逐渐减小, 形成“挤出”现象。最大主应力方向在南部以 NNW 向为主, 北部以 NNE 向为主, 总体为近 SN 向。将模拟结果与构造勘察、地震活动和 GPS 测量结果进行了对比, 它们具有很好的一致性, 良好地揭示了青藏高原构造活动规律、断层活动强度和东向位移的驱动机理, 青藏高原现今活动是印度板块向北推挤和深部物质东流共同作用的结果。

关键词: 构造应力场; 数值模拟; 青藏高原; 活动断裂

中图分类号: P554

文献标识码: A

0 前言

构造应力场与速度场是研究地壳构造变形、地壳运动和断层活动的重要指标。对评价地壳稳定性、断层活动性和地质灾害效应具有重要意义。本文采用 ANSYS 软件, 在地质调查、活动断层勘测和 GPS 测量的基础上, 建立合理的地质构造模型和边界条件, 进行了青藏高原现今应力场及速度场的数值模拟。模拟结果与野外勘察、活动断层研究和 GPS 测量结果具有良好的可对比性, 为分析现今构造活动性、断层活动强度和驱动机理提供了重要依据。

1 地质体介质模型的选择

地质体在长期地应力作用下, 其力学性状具有粘性流体的特征, 其变形与时间有关。地质体被近似看作不可压缩牛顿粘性流体。其本构方程为^[1-2]:

$$\sigma_{ij} - P_{ij} = 2\eta D_{ij}$$

式中 σ_{ij} 为应力张量, $P_{ij} = \begin{Bmatrix} P & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & P \end{Bmatrix}$

收稿日期: 2005-03-28

基金项目: 国土资源大调查项目 (1212010340302) 与科技部国际合作重点项目 (2001CB711001) 资助。

作者简介: 王连捷 (1933-), 研究员, 长期从事地应力测量, 构造应力场数值分析及其在地质和工程中的应用研究工作。联系电话: 68422373。

$P = \frac{1}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ 称为平均应力，它与粘性流体的变形无关。 $(\sigma_{ij} - P_{ij})$ 称为粘滞应力张量，也可以称为偏应力张量^[1]。

η 称粘性系数， D_{ij} 为应变速度张量分量。

上式指出，粘滞性应力张量的法向分量与法向应变速度张量分量成正比，剪应力与剪应变速度张量成正比。

2 应力场和位移场模拟方法

应力场和位移场模拟的方法有多种，如试算法，叠加反演法等。作者采用试算法，其基本步骤如下：

在给定边界条件的情况下，调整边界应力、边界位移速率和介质的力学参数。经过多次试算，使得在已知点处的位移速率或应力的计算值与实测值或给定值相一致。这时所得到的位移速度场及应力场即为所求解的结果。

在地质情况比较熟悉，并有一定的模拟计算经验的条件下，这种方法可以得到宏观上比较理想的结果。

3 地质模型

根据文献 [3, 4] 的地质构造图，建立二维地质模型，其范围为东经 $87.5^\circ \sim 94.2^\circ$ ，北纬 $28.8^\circ \sim 37.1^\circ$ 相当于南北长 960km，东西宽 700km。

模型中包括主要的构造和活动断层。断层为近 EW-NWW 向的走滑断层。断层按断层带处理，断层带具有一定的宽度。

4 有限元模型

4.1 有限元网格划分

采用二维模型，四边形网格，共划分单元 6881 个，节点 6899 个。

4.2 边界条件

北部边界在南北方向和东西方向上均固定约束，南部边界受印度板块向北推挤，每年有 30mm 向北的位移速度，每年有向东 12mm 的位移速度。东部边界和西部边界为应力边界。

在模型的内部有向东的体积力，其大小为 0.38kN/m^3 (图 1)。

4.3 力学参数

模型的介质为粘性流体，其力学参数为岩石的粘性系数，共采用了 14 种粘性参数，断层带上取相对较低的粘度。粘性参数没有实测数据，根据地壳深部岩石力学中常用的参数，并结合西藏地区构造活动的特点和反复试算，选适当的参数，具体数据如表 1。

断裂带为不连续面，而作者采用的是连续介质力学的方法来模拟不连续面的问题。因此，需要采用适当的断裂带介质参数，使其产生的位移与不连续面产生的位移是近似相等的。选用表 2 中的参数，基本上可以实现此目的。

表 1 材料参数

Table 1 Mechanical parameter of rocks

地质体	粘性系数 $\eta/$ (泊)	泊松比 μ
断裂带	1×10^{20}	0.5
	3×10^{20}	0.5
	4×10^{20}	0.5
	8×10^{20}	0.5
	2.5×10^{21}	0.5
	3×10^{21}	0.5
	4×10^{21}	0.5
非断裂带	6×10^{21}	0.5
	1.7×10^{23}	0.5
	2×10^{23}	0.5
	2.5×10^{23}	0.5
	3×10^{23}	0.5
	3.2×10^{23}	0.5
	5×10^{23}	0.5

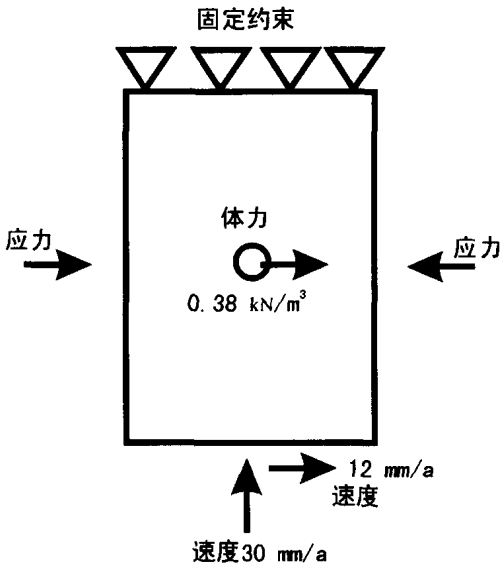


图 1 边界条件

Fig.1 Boundary condition of the model

表 2 GPS 观测结果^[5]

Table 2 GPS observations

序号	地名	东经 (°)	北纬 (°)	位移速率 (mm/a)	
				东西向	南北向
1	江孜	89.57	28.91	15.1	25.6
2	日喀则	88.86	29.25	14.4	25.2
3	拉萨	91.1	29.66	20.4	18.6
4	达孜	91.36	29.66	19.8	18.5
5	巴拉	90.8	29.74	19.8	21.8
6	那曲	92.04	31.47	22.8	14.3
7	索县	93.78	31.89	25	10.2
8	安多	91.69	32.28	21.2	13.2
9	唐古拉	91.86	33.23	22.4	12.4
10	沱沱河	92.45	34.21	23.2	6.9
11	格尔木	94.87	36.43	11.6	9.5

5 模拟结果

5.1 应力场

从模拟结果来看, 应力场的分布是不均匀的, 在东部应力偏低, 最大水平主应力一般在 60MPa ~ 110MPa 之间。西部应力偏高, 一般在 140MPa ~ 200MPa 之间。在断层端点和断层复合部位存在显著的应力集中现象, 最大水平主应力可达 400MPa 以上 (图 2)。最小水平主应

力在东部一般为 10MPa~40MPa，西部一般为 40MPa~80MPa。断层端点及断层复合部位应力集中，最小水平主应力达 150MPa 以上。局部地区有张应力。剪应力分布主要在 30MPa~80MPa 之间，应力集中处为 120MPa，并有两条 NW 向和 NE 向最大剪应力带如图 3。剪应力分布与断层活动性质非常一致，即反扭断层地区（北部）剪应力为负值，顺扭断层地区（南部）剪应力为正值。无论是正应力还是剪应力，在应力集中处，都有强烈地震活动。震中大部分分布在断层斜列交会处的应力集中处（图 2，图 3）。

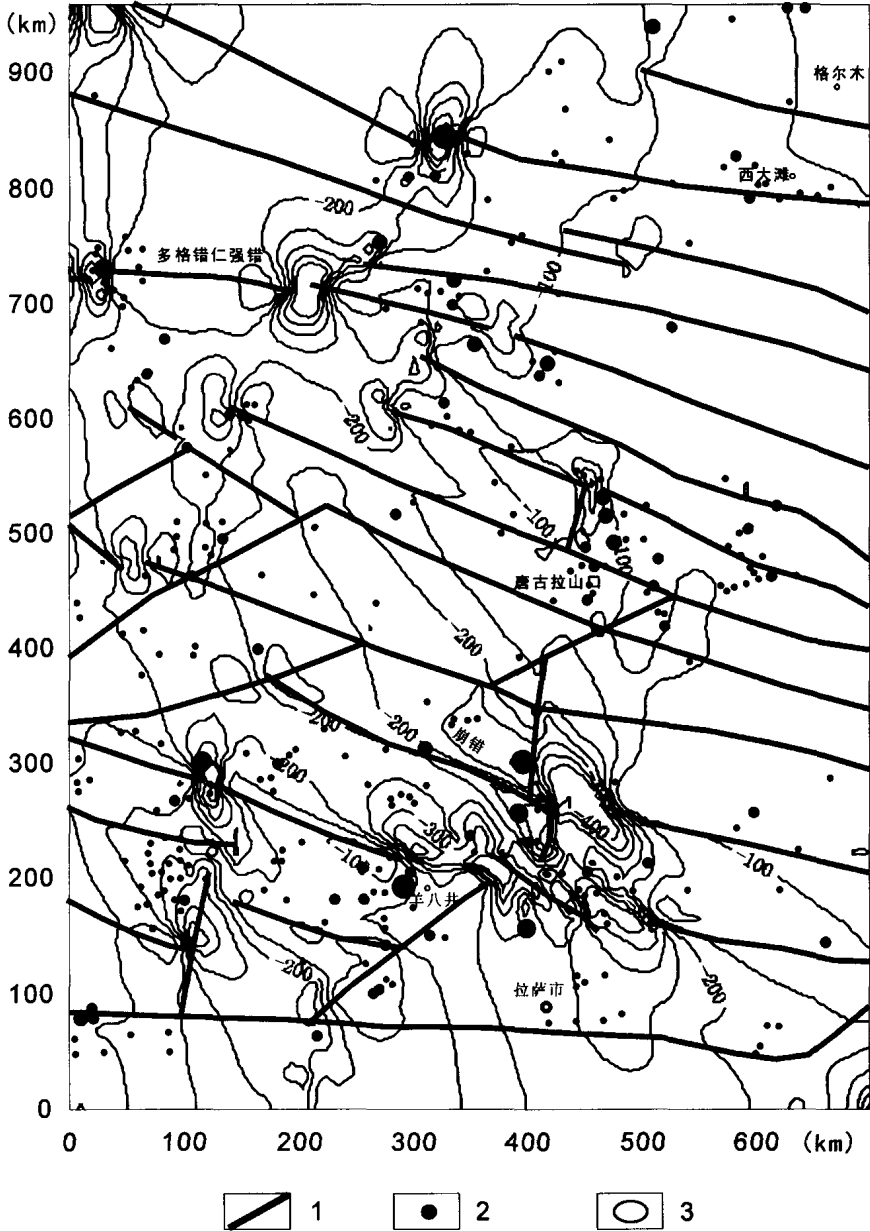


图 2 青藏高原中段最大水平主应力等值线

Fig.2 Countors of maximum horizontal principal stress in the central Qinghai-Tibet Plateau

1. 断层; 2. 地震震中; 3. 剪应力等值线

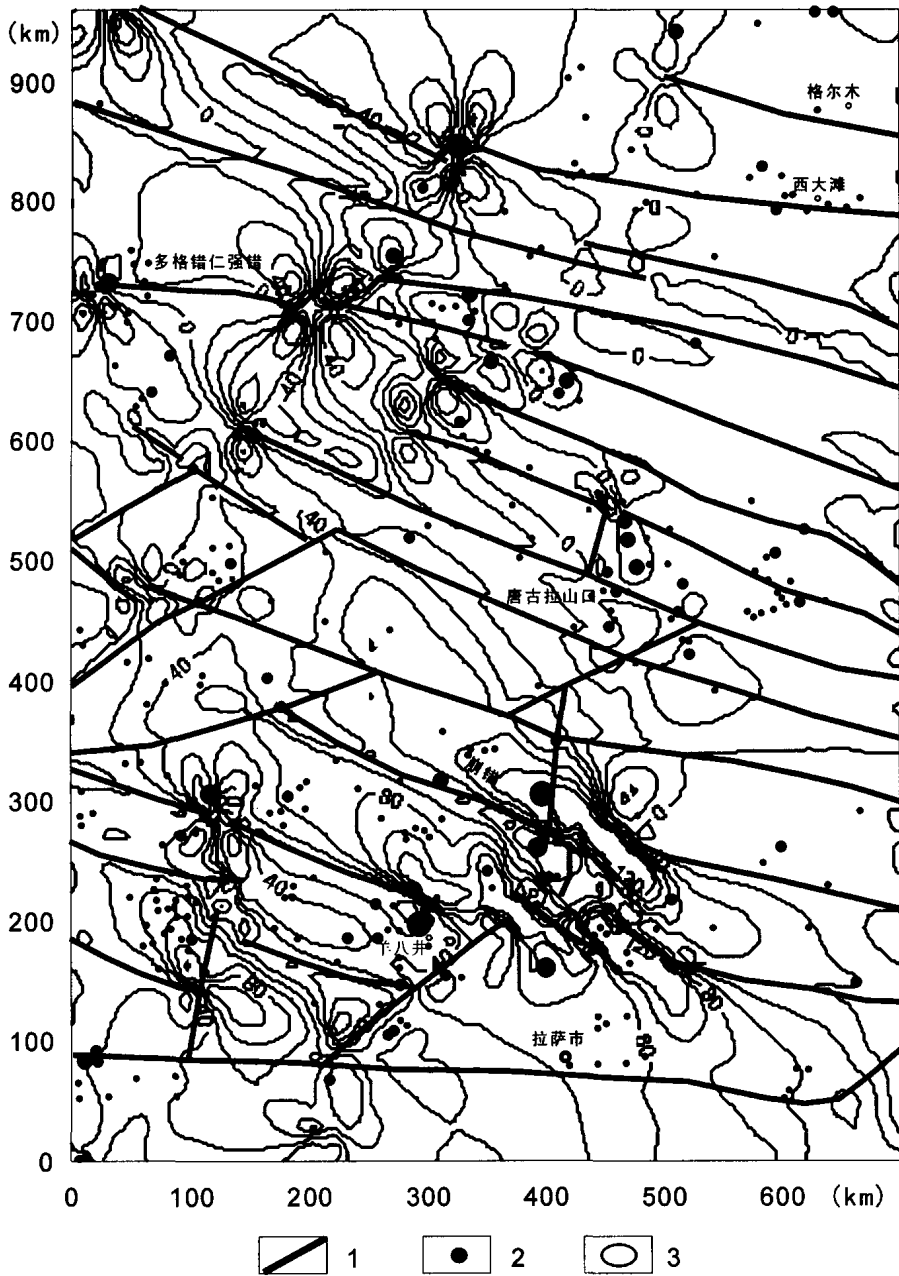
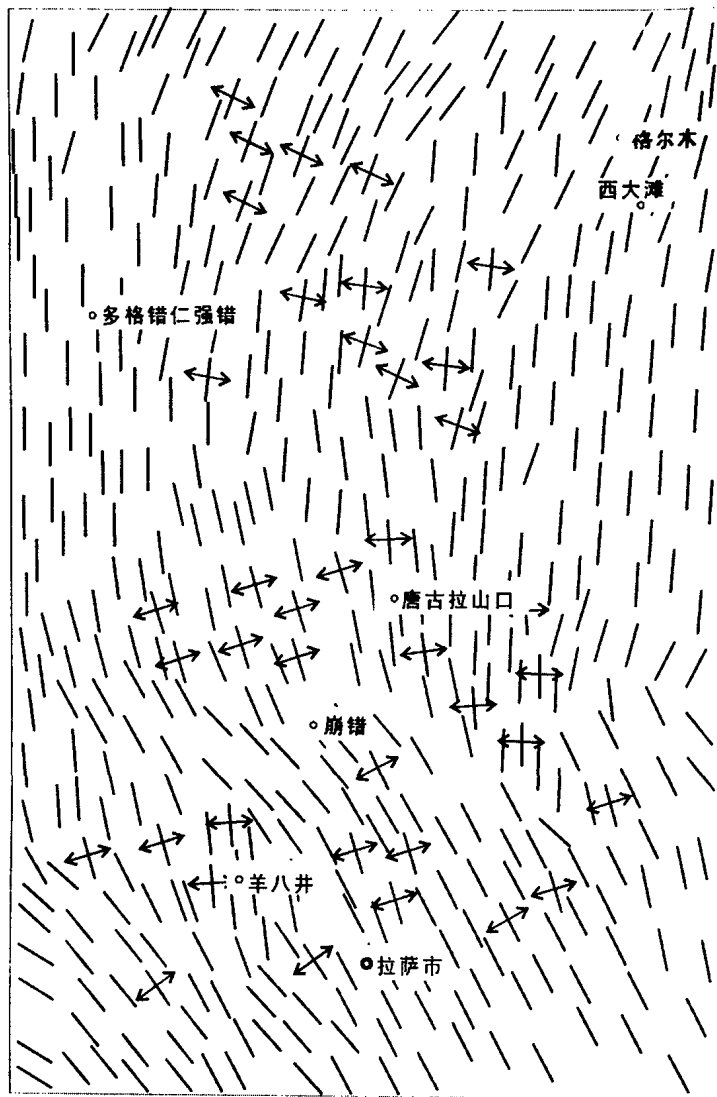


图3 青藏高原中段剪应力等值线

Fig.3 Countours of shear stress in the central Qinghai-Tibet Plateau

1. 断层; 2. 地震震中; 3. 剪应力等值线

最大水平主应力方向，在唐古拉断层以南最大水平主应力方向为 NNW，以北地区为 NNE 向，总体方向为近 SN 向，如图 4。主应力方向分布的特点与断层的扭动方向，东向位移速度分布，GPS 测量是协调一致的。北部地区断层为反扭，而最大水平主应力方向为 NNE 向，南部地区断层为顺扭，最大水平主应力方向为 NNW 向。可见，主应力方向与断层扭动方向完全协调。另外，主应力迹线由南到北呈弧形形态，这种应力场与地壳物质东流现象也是一致的。



— 最大主压应力方向 ↔ 张应力方向

图 4 青藏高原中段主应力方向

Fig.4 Orientation of horizontal principal stresses in the central Qinghai-Tibet Plateau

5.2 速度场

模拟结果表明，位移速度场总体特点是向北和向东位移。作者将位移速度矢量分解为 SN 向和 EW 向，并将模拟结果与地质测量和 GPS 观测相对比。结果如下：

(1) SN 向位移速度

向北的位移速度不均匀，在南部大，向北逐渐减小。在南部边界附近位移速度为 25 ~ 30 mm/年，在北部边界附近位移速度为 5 ~ 10 mm/a。将表 2 中 GPS 观测的位移速度 SN 向分量^[5]和相应测点的模拟结果画在图 5 上以便于对比。由图 5 可以看出，除纬度 36.43°的测点（格尔木测点）外，其他测点的位移速度分布规律一样，只是速度大小略有不同。模拟结果比 GPS 观测结果偏大。但变化趋势相同。说明模拟结果是合理的。模拟结果偏大是南部边

界位移速度条件决定的。

(2) EW 向位移速度

总体来看有一向东的位移速度，而且是不均匀的（图6），在唐古拉断层附近（F43和F50），向东的位移速度最大，为53.5mm/a（相对北部边界）。向北和向南位移速度逐渐减小，北部边界向东的位移速度相对为0，南部边界向东的位移速度为12mm/a。

由图6可以看出，由于东向位移速度不均匀，显示出物质向东呈弧形挤出的现象。

作者将不同方法得到的东向位移速度进行了对比如图7。由图7可见，东向位移速度分量的模拟结果与地质测量、GPS测量结果的东向分量和断层滑移方向基本吻合，速度大小略有不同，速度变化规律是一致的。

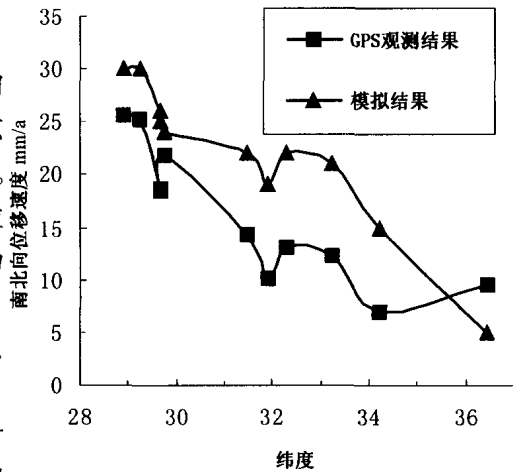


图5 向北的位移速度随纬度的变化
Fig.5 Variation of velocity of north-directed displacement with latitude

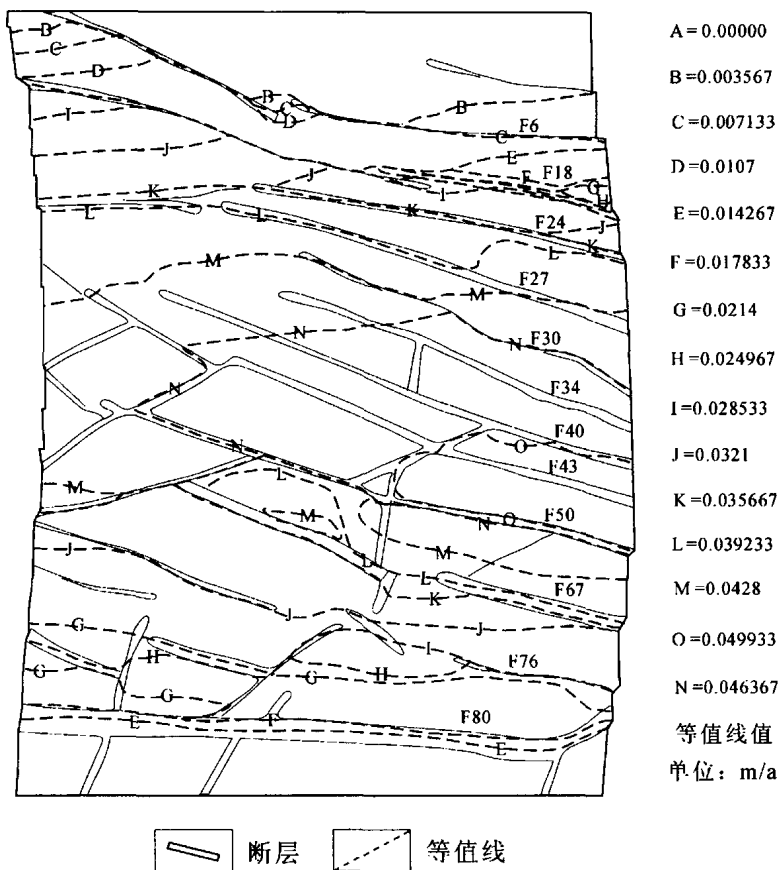


图6 青藏高原中段构造变形和东向位移速度等值线
Fig.6 Tectonic deformation and contours of the east-directed displacement velocity in the central Qinghai-Tibet Plateau

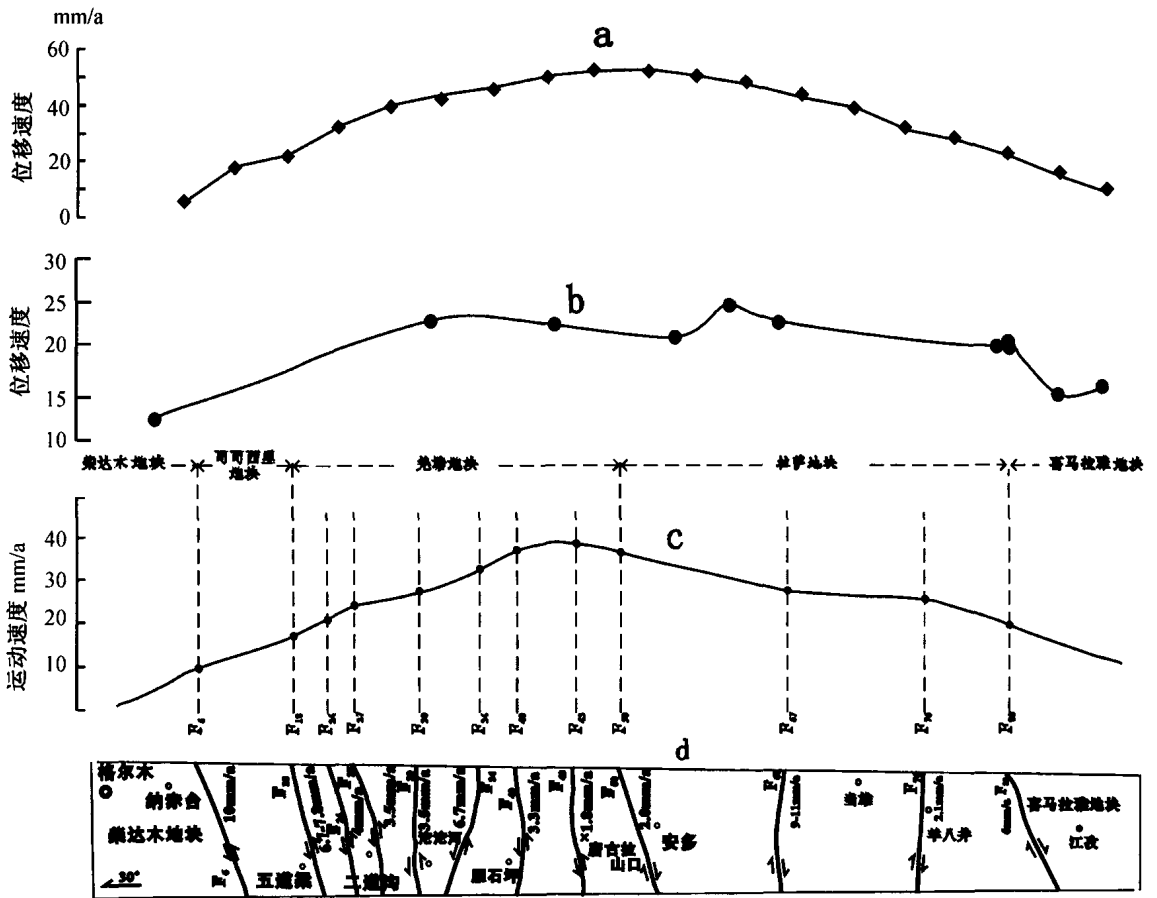


图 7 不同方法得到的青藏高原东向位移速度

Fig.7 East-directed displacement velocity of the Qinghai-Tibet Plateau obtained by using different methods

a. 数值模拟; b. GPS 观测; c. 地质测量估算; d. 断层滑移方向和速度 (GPS^[5])

5.3 断层两侧的相对错动速率

在计算出位移场之后，根据断层两侧沿断层走向位移速率的差别，可以计算出断层两侧的相对错动速率。

为了观察断层在不同位置的活跃性和相对错动速率，作者在每个断层上都选择了 3 个量测点，在这些点上测量出断层两侧的相对错动速率如表 3。

由表 3 可以看出，模拟结果得到的断层错动速率与地质方法量测的结果基本一致。

断层的相对错动速率有如下特点：

(1) 各断层的相对错动速率是不同的，有的断层错动速率较大，有的较小，断层相对错动速率最大可大于 15mm/a，最小为 1.4~1.5mm/a。

(2) 同一断层不同地点位移速率不同，即同一断层不同位置活动程度是不均匀的，一般来说中部位移速率变大。

(3) 断层的扭动方向在唐古拉断裂以北为反扭，在唐古拉断裂以南为顺扭。这种断层扭动方向截然相反的现象与西藏地区物质向东流动有关。靠近西藏中部唐古拉断裂附近东向位移速度最大，向南北两侧东向位移速率逐渐变小。由于这种速度的差异产生南北两侧断层扭动相反的现象。

表 3 断层错动速率
Table 3 Rate of fault displacement

断 层		错动速率 mm/a				地质测量
		模拟结果				
编号	名称	测点 1	测点 2	测点 3	平均	
F6	昆仑山活动断裂	-11	-15	-13	-11 ~ -15	-10 ~ 15
F18	可可西里活动断裂	-5.0	-8.2	-7.2	-5 ~ -8.2	-6 ~ -8
F24	风火山北麓活动断裂	-4.2	4.4	-4.4	-4.2 ~ -4.4	-4
F27	二道沟山南活动断裂	-3.7	-2.4	-2.2	-2.2 ~ -3.7	-3.5
F30	乌丽活动断裂	-2.7	-2.9		-2.6 ~ -2.9	-3.5
F34	开心岭活动断裂	-3.9	-3.4	-2.6	-2.6 ~ -3.9	-6.7
F40	雁石坪-木乃山断裂	-2.5	-2.0	-2.2	-2.0 ~ -2.2	-3.3
F43	唐古拉山北断裂	-1.5	-1.5	-1.4	-1.4 ~ -1.5	-1.9
F50	头二九活动断裂	2.7	2.8	1.9	1.9 ~ 2.8	2.0
F67	崩错活动断裂	11.8	12.8		11.8 ~ 12.8	9 ~ 11
F76	格仁错活动断裂	2.3	2.6	1.8	1.8 ~ 2.6	2.1
F80	雅鲁藏布江活动断裂	5.4	6.4		5.4 ~ 6.4	6.0

注：表中断层编号与图 7 断层编号相同

6 结论

(1) 构造应力场和速度场的有限元数值模拟良好地揭示了青藏高原中段现今构造活动特征、地壳运动规律和驱动机理。青藏高原中段现今地壳构造应力场与活动断层有密切关系。

(2) 青藏高原现今地壳最大主压应力方向呈近 SN-NNW-NNE 和 NE 向。在唐古拉山及以南地区，最大主压应力方向以 NNW 向为主；在唐古拉山以北地区，最大主压应力方向以 NNE-NE 向为主。地壳最大主压应力迹线总体呈向西突出的弧形，弧顶位于唐古拉山西端。这种规律性分布的区域构造应力场驱动地壳物质东向滑移或东向挤出。

(3) 在一些局部地区，存在近 EW 向拉张应力，这对地壳伸展构造变形和地堑盆地裂隙具有重要驱动作用。

(4) 对比数值模拟、活动断层勘测和历史地震资料，发现青藏高原中段活动断层的交叉复合部位（如崩错、羊八井地区）、斜列分布活动断层的斜接复合部位（如玛尼东侧多格错仁强错地区）和活动断层尚未穿切的构造闭锁部位（如东昆仑西段布喀达坂峰地区），是现今区域构造应力高度集中和地壳变形速率大幅度增加的重要构造部位，也是孕育、发生强烈地震的主要区域，属现今强烈构造变形和地壳高度不稳定地区。这些规律为分析青藏高原中段活动断裂强震孕育条件提供了重要依据。对判别未来百年地震活动趋势、中强地震潜在震源区具有重要的意义。

(5) 青藏高原中段区域构造应力场、位移速度场及断层相对运动速率、断层两侧地块相对扭动方向均说明，现今地壳受到印度板块向北推挤产生的近 SN 方向水平挤压和物质向东流动双重水平动力的联合作用。地壳物质向东流动与地壳深部存在东向作用力有关。只有近

SN向挤压不能产生如此规模的物质向东流动，必须考虑深部向东的作用力。据此认为，近SN方向水平挤压、深部东向作用力，地壳物质东向流动是青藏高原中段第四纪断层扭动和现今地壳运动的主要驱动力，是形成青藏高原中段现今地壳构造应力场的主要原因。

参 考 文 献

- [1] W D 米恩斯, (陈资平等译). 应力与应变 [M]. 煤炭工业出版社, 1980.
- [2] 王世民, 王仁. 线弹性问题与牛顿流体问题的对应关系 [J]. 地球物理学报, 2000, 43 (1): 62~95.
- [3] 吴珍汉. 青藏铁路沿线断裂活动的灾害效应 [J]. 现代地质, 2003, 17 (1): 1~6.
- [4] 吴珍汉. 青藏高原腹地的地壳变形与构造地貌形成演化过程 [M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [5] 张培震, 王琪. 中国大陆现今地壳运动与构造变形 [A]. 见: 马宗晋等主编, 青藏高原岩石圈现今变动与动力学 [C]. 北京: 地震出版社, 2001. 21~25.

NUMERICAL MODELING OF THE PRESENT TECTONIC STRESS FIELD IN THE CENTRAL QINGHAI-TIBET PLATEAU

WANG Lian-jie, WU Zhen-han, WANG Wei, SUN Dong-sheng
(*Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract: Considering crustal rocks as viscous fluids, the tectonic stress field and velocity field of the central segment of the Qinghai-Tibet Plateau are modeled by using the finite element method. The results of modeling indicate that the Qinghai-Tibet Plateau is generally displaced toward the north and east. The velocity of north-directed displacement is highest in the south and gradually decreases from south to north. The velocity of east-directed displacement is highest near the Tanggula fault and gradually decreases toward the south and north sides, showing an "extrusion phenomenon". The maximum principal stress is oriented mainly in a NNW direction in the south and in a NNE direction in the north, generally in a N-S direction. Comparison of the modeling results with the results of tectonic survey and earthquake activity and GPS measurements shows that they are in good agreement. This well reveals the characteristics of tectonic activity, intensity of fault activity and driving mechanism of east-directed displacement in the Qinghai-Tibet Plateau. The present activity of the Qinghai-Tibet Plateau is the results of combined action of northward push and compression of the Indian plate and eastward flow of deep materials.

Key words: tectonic stress field; numerical modeling; Qinghai-Tibet Plateau; active fault