

# GPS 观测约束下的中国大陆活动地块运动学模型\*

王伟<sup>1,2)</sup> 王琪<sup>1)</sup>

(1) 中国地震局地震研究所, 武汉 430071  
(2) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要** 利用中国大陆及邻区 1 683 个 GPS 测站的观测资料, 建立由 31 个活动地块组成的大陆变形运动学模型, 这些地块主要以约 30 条产状各异、滑动速率不等但不高于 20 mm/a 的第四纪活动断层为边界。模拟中将大陆构造变形视为活动地块的刚性旋转和地块边界断层闭锁的弹性变形的综合响应。结果表明, 在 GPS 观测精度内, 该模型整体上较好地反映了中国大陆构造变形的主要特征。模型给出的主要断层滑动速率在青藏高原及周边为 6 ~ 18 mm/a, 在中国东部地区为 1 ~ 4 mm/a, 与地质长期速率比较一致; 模拟表明地块内部变形不过  $10 \times 10^{-9}$ /a, 与 50 ~ 100 km 宽的边界带局部变形相比, 块体内部变形十分有限。这说明块体的旋转运动而非连续分布变形是大陆构造的主要活动方式, 板块构造原则仍可用于刻画大陆变形的运动学特征。

**关键词** GPS; 中国大陆; 活动地块; 旋转运动; 地壳变形

**中图分类号**: P227

**文献标识码**: A

## KINEMATICAL MODEL OF CRUSTAL BLOCKS OF CHINA CONTINENT REVEALED BY GPS MEASUREMENTS

Wang Wei<sup>1,2)</sup> and Wang Qi<sup>1)</sup>

(1) *Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071*  
(2) *Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081*

**Abstract** Using the measurements at 1 683 GPS stations in China continent and its adjacent areas, we built a kinematical deformation model of the continent composed of 31 active blocks which are bounded on about 30 Quaternary active faults with different attitude and slipping rate less than 20 mm/a. In modeling, the tectonic deformation of the continent is regarded as the combination of coherent motion of the relevant block and elastic strain induced by locking of boundary fault. The simulated results show that, in the GPS measurement accuracy range, the model reflects the main features of tectonic deformation of China continent well. The slip rates offered by the kinematic model of the major faults in Qinghai-Tibet plateau and surrounding area are in ranges of 6 - 18 mm/a and 1 - 4 mm/a in Eastern China, which are consistent with geological observation in long time. The numerical simulation indicates that the internal deformation of crustal blocks compared with the local deformation of the margin zone of 50 - 100 km wide is limited, about  $10 \times 10^{-9}$ /a. This suggests that the continental deformation pattern is not continuous-like but block-like, and the plate tectonics principle may still be applicable to characterize the deformation kinematics in Asia.

**Key words**: GPS; Chinese continent; active block; block rotation; crustal deformation

## 1 引言

近些年来,以建立大陆构造变形速度场为目的的各类观测迅猛展开<sup>[1-6]</sup>,尤其是以 GPS 为代表的空间大地测量在短短 10 年内就覆盖了整个亚洲大陆变形地区<sup>[5,6]</sup>,且观测精度和密度不断提高,不仅揭示出大陆构造的新特征,也为构建、识别各类运动与动力学模型提供了重要基础。由于早先存在连续分布变形与有限地块的相互运动之争,日益精细的速度场到底反映了一种什么模式的大陆构造运动,乃是新形势下需要研究的关键问题<sup>[2]</sup>。

初步研究表明,中国大陆、尤其是青藏高原地区现今地壳变形在整体上表现为连续分布<sup>[2,6,7]</sup>,基于岩石圈连续变形的粘性薄席模型,与 GPS 速度场吻合较好。与以往针对活动断层滑移速率的模拟研究类似,模拟 GPS 数据的成功仍不能证明连续变形假设,更不能排除地块运动模型<sup>[8]</sup>。因为粘性薄席模型没有顾及脆性上地壳,不能反映这一层面以断层滑移、地震破裂为主要特点的力学过程。

对活动构造的定量化研究表明,中国大陆地区可以划分出不同级别的地壳与岩石圈地块<sup>[9]</sup>,板内活动以各个构造单元的块体运动为特征,且为近来 GPS 观测所证实<sup>[10-12]</sup>。在美国西部、新西兰等其它变形地区,地块模型对各类观测资料进行了成功拟合<sup>[13,14]</sup>。这些拟合结果显示,大陆内部弹性地块的旋转运动是主导方式,它在很大程度上吸收了地块边界的汇聚作用。由于中国大陆构造样式十分复杂、应变条件独特、构造变形宽广强烈,地块活动模式能否完整地体现中国大陆、尤其是变形比较强烈的板块、地块边界处的变形特征仍有待深入研究。

我们根据更多 GPS 数据,精化活动地块的运动学模型。在顾及地块边界断层滑移以及内部弹性应变条件下,拟合实测 GPS 速度场,整体性地反演活动地块的运动学参数,从而保证地块运动的协调性和边界带断层应变与地块运动的一致性。我们数值模拟的目的是用有限数量的活动地块完整、自洽、有效地再现中国大陆现今构造变形,强调青藏高原的运动学仍可通过低速率地块活动来吸收板块汇聚导致的陆内变形。

## 2 反演算法

刚性板块可以通过球坐标下沿欧拉极的旋转(欧拉矢量)来描述,但对相对较小的大陆地块,其运动不仅包含整体旋转,围限断层构造活动引起的变形也不能忽略。在某个具体部位,变形影响与距离断层的远近以及断层几何、运动学特征有关。按

此原理,对于欧拉矢量为  $\Omega_0$  地块,其中任意一点  $R$  的位移速率  $V$  可表示为:

$$V = \Omega_0 R + \sum_{i=1}^k v_i (R_i, \Omega_i, R_i, f_i) \quad (1)$$

其中,  $\Omega_i (i=1, 2, \dots, k)$  代表周边  $i$  个地块的欧拉矢量,  $R_i, f_i$  相应表示分隔这两个地块的断层地面坐标和断层面几何参数,而  $V_i$  对应于这条分割断层构造滑移引起的地块变形。

构造断层活动缘于两个相互作用岩石圈地块在接触部位的差异运动,断层活动的力学机制决定了断裂带两侧地块变形的时空分布。通常位于上地壳脆性层内断层接触面由于摩擦因素,在两次地震之间总是处于闭锁状态中,断层带内积累弹性应变,地块周边变形,且跨断层连续变化。当接触面应力大于断层强度,断层瞬间错动便导致地震。其结果是弹性应变释放,地块形状恢复。因此在一个地震周期中,脆性上地壳断层的力学行为表现为与时间相关的粘滑<sup>[15]</sup>;而在闭锁深度以下韧性层内,与温度有关的摩擦力大大降低,滑移受地块间差异运动控制,表现为与时间无关的蠕滑,其幅度可以用地块相对旋转来估算。

### 弹性半空间位错模型

$$V_i(R, \Omega_i, f_i) = \varphi G(R, R_i, f_i) \{R_i(\Omega_i - \Omega_0)\} \quad (2)$$

这里  $G$  是将地表变形与断层蠕动位错对应的格林函数,完全由测站和断层几何参数确定,利用 Okada 公式计算<sup>[16]</sup>。这里我们引用闭锁系数  $\varphi_i$  (区间  $[0, 1]$ ),其定义为  $\varphi = 1 - v/V_0$ 。  $v, V_0$  分别代表断层的实际滑动速率和根据地块相对运动计算的理论速率。

$\varphi$  体现了断层闭锁程度<sup>[13,14]</sup>,用以刻画断层在不同深度、不同部位的状态。我们总是假定实际滑动速率不随时间变化,忽略下伏粘性层的震后松弛调整(假定其粘滞度  $> 10^{19}$ ),  $\varphi$  在地震周期中是常数。 $\varphi = 1$  时断层的实际滑动速率为零,断层完全闭锁,在实际处理时,一般针对埋深较浅的断层; $\varphi = 0$  表示断层自由滑动,主要针对在孕震层以下韧性剪切断层。 $\varphi$  可以事先设定,更多情况是根据 GPS 实测数据估算,可灵活应对断层活动的复杂性和不确定性。在形式上反映了活动断层实际闭锁深度<sup>[13,14]</sup>。

大陆地块的一个重要特征是内部存在次级断层,仍有适量的构造活动,比较典型的是川滇和青藏高原地区,地震分布很广。借用均匀应变机制来代表一部分活动,因此,一个测站的速率完整观测方程为

$$V = \Omega_0 R + \sum_{i=1}^k \varphi_i G(R, R_i, f_i) \{R_i(\Omega_i - \Omega_0)\} +$$

$$T(R - R_0) \quad (3)$$

这里  $R_0$  是地块的质心,  $T$  是应变张量<sup>[17]</sup>。

如 GPS 测站总数为  $n$ , 采用如下目标函数估算  $m$  个旋转地块的欧拉矢量和  $k$  条断层闭锁系数, 实现式(3)计算的模型速率  $V_i$  与实测速率  $V_j^{\text{GPS}}$  (观测精度为  $\sigma_j^2$ ) 的最佳拟合:

$$O(\Omega_{|i \leq m|}, \Omega_{|i \leq k|}) = \sum_{j=1}^n (V_j^{\text{GPS}} - V_j)^2 / \sigma_j^2 = \min, \quad (n \gg 3m + k) \quad (4)$$

需要指出的是, 当同时求解欧拉矢量和闭锁系数这两类参数时, 观测方程为非线性, 且两类参数间具有很强的耦合性。反演计算采用 DEFNODE 软件<sup>[13,14]</sup>, 用模拟退火算法进行全局搜寻, 确定最佳参数。

### 3 活动地块模型

活动地块主要是由第四纪以来活动断裂围限的地壳或岩石圈层面的构造单元<sup>[18]</sup>。对这些活动断裂几何学和运动学特征以往是依据区域地质、地貌、地震资料确定<sup>[1]</sup>, 近来 GPS 所提供的定量化数据可以识别地貌标志不清、活动幅度不明的活动剪切带, 有可能使得活动地块划分的地理界限更加精细、构造意义更加确切、整体方案更加全面。

我国第四纪、尤其晚更新世以来的活动断层广泛发育, 为地块划分提供了多样化的选择, 例如, 川滇地区 GPS 可以确定的滑移幅度在 2~9 mm/a, 活动断层有 10 多条, 活动地块 9 个。在全国范围可以考虑的大大小的构造单元为数不少, 组合变化更多。这里我们以张培震<sup>[18]</sup>的中国大陆及周边地区活动地块划分方案为基础, 而在青藏高原地区参考了 Chen<sup>[19,20]</sup>的研究结果。这些地块的设立充分考虑了围限断层的活动性和相邻地块的差异性, 因此构造意义明确、尺度大小适当, 与我们的初衷——用尽可能少的独立地块建立大陆活动构造的运动学模型比较一致, 又比较适合现有 GPS 资料建模。

我们依据现有 GPS 速度场, 进一步调整了前人的地块布局(块体轮廓如图 1 所示), 例如对于印度-缅甸海沟以东、红河断层以南地区, 我们依据奠边府、南汀河和石揭断层构建缅甸、滇南、滇西和印支地块。此外川滇地块包含金沙江以西的藏东地区, 并以丽江-小箐河作为地块的南边界。该断裂与北西向红河断裂的中南段以及南北向安宁河-则木河-小江断裂组成滇东地块。

在我国西部地区, 巨大的东西向弧形断裂带将青藏高原分隔, 形成东西走向的条状地块, 喜马拉雅、拉萨、柴达木、祁连山、天山等, 与东部地区块状

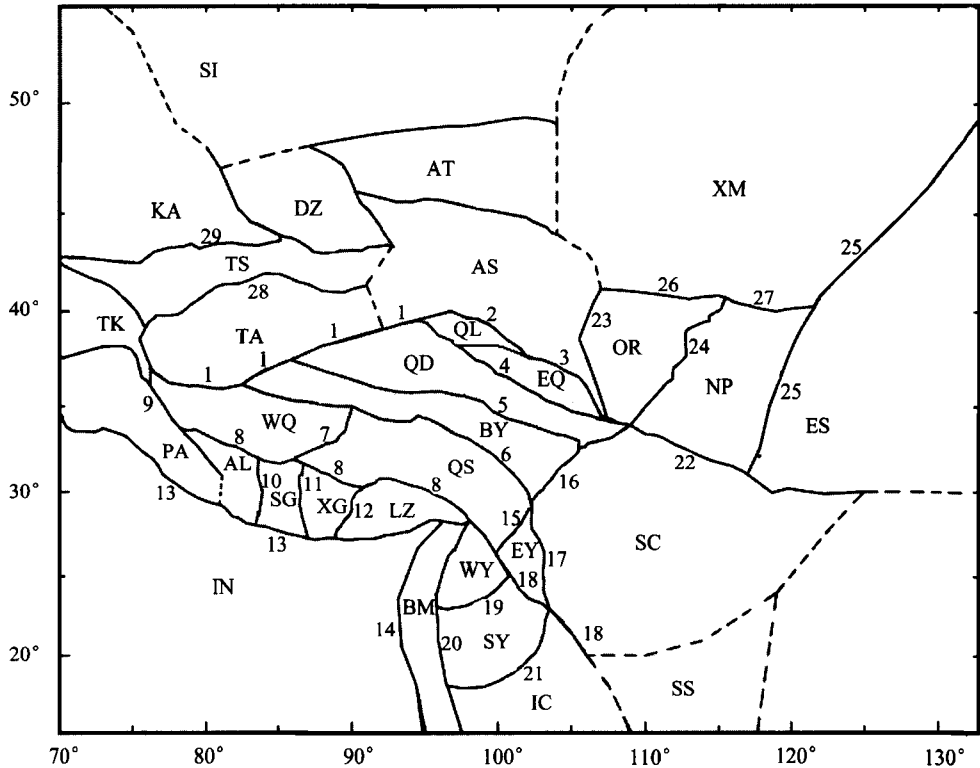
为主的地块布局, 如华南、鄂尔多斯形成鲜明对比。活断裂研究表明, 这些条状地块有可能进一步细分, 如在青藏高原的东北缘, 王敏等<sup>[11]</sup>将柴达木盆地东边缘北北西走向的鄂拉山断裂, 作为分割柴达木、西宁地块的边界。GPS 确定这两个地块具有不同的运动特征。在藏南地区 Chen<sup>[20]</sup>将亚东-谷露, 以及隆格尔(Thakkola)地堑作为分割拉萨地块的重要依据。我们与前人不同的是, 将拉萨地块和喜马拉雅当作一个整体, 并依据喀喇昆仑断层以及藏南正地堑将其分割为帕米尔-克什米尔、阿里、萨嘎、日喀则、林芝 5 个地块, 尽管有研究表明雅鲁藏布江是一条活动构造, 具有一定右旋走滑分量<sup>[20]</sup>。

由此构建的地块构造模型, 总数达到 31 个块体。其中包含有两类力学性质不同的构造单元: 一种是刚性地块或亚板块, 比较典型如塔里木、阿拉善、鄂尔多斯、华南等, 其内部岩石圈强度与板块无异。由于地块面积较大, 周边断层的应变对地块运动整体性影响很小; 第二种是陆内造山带, 如喜马拉雅、天山和祁连山乃至青藏高原, 以往视为连续变形带<sup>[21]</sup>。在这些构造单元内变形受边界逆冲断层控制, 方向一致, 变形幅度呈连续变化, 与距离断层的远近有关。如果扣除了与边界断层有关变形和内部弹性应变, 地块的整体运动仍十分明显。

### 4 模拟计算

使用的 1 683 个 GPS 测站速率(GPS 点位分布见图 3), 国内部分是利用 GIPSY 软件处理得到的, 其中 1 000 多点来自“中国地壳运动观测网络”观测成果<sup>[22]</sup>, 境外天山的数据来自美国 UNAVCO 数据库。GPS 数据处理方法与以往相同<sup>[5]</sup>, 参考框架为 ITRF2000。其它地区如蒙古、印度、印支、缅甸等来自已公开发表的观测成果<sup>[23-26]</sup>。由于不同作者给出的速度场结果其参考框架的实现有所不同, 我们通过公共测站, 用旋转变换把参考框架不同的区域速度场转换到 ITRF2000 下, 形成框架一致整体速度场。在扣除了欧亚板块整体旋转后, 得到相对于欧亚板块固定的中国大陆变形的 GPS 实测速度场, 其测站速度的平均测定精度优于 2 mm/a。在使用中, 删除了少量站间距小于 5 km、明显与周缘测站位移趋势相悖的测站。

将边界分段处理。根据走向变化或长度设置分段节点, 并依据 England 等<sup>[1,2]</sup>给出的基本参数计算各个边界段的格林函数。一般将正、逆断层的倾角设定 45°(喜马拉雅例外, 设定 10°), 而走滑断层为直立断层, 倾角接近 90°。断层的闭锁深度设定为 30 km, 其中最上部的 10 km 断层完全闭锁, 深度



块体名称:AL(阿里);AS(阿拉善);AT(阿尔泰);BM(缅甸);BY(巴颜喀拉);DZ(准噶尔);EQ(祁连东);ES(鲁东);EY(滇东);IC(印支);IN(印度);KA(哈萨克);LZ(林芝);NP(华北平原);OR(鄂尔多斯);PA(帕米尔-克什米尔);QD(柴达木);QL(祁连山);QS(羌塘东-川西);SC(华南);SG(萨嘎);SI(西伯利亚);SS(南海);SY(滇南);TA(塔里木);TK(塔吉克);TS(天山);WQ(羌塘西);WY(滇西);XG(日喀则);XM(兴安-东蒙)

块体边界断层:1 阿尔金;2 祁连山;3 海源;4 南祁连山;5 昆仑山;6 鲜水河;7 双湖;8 喀喇昆仑-嘉黎;9 喀喇昆仑;10 隆格乐;11Tangra-Yum;12 亚东-谷露;13 喜马拉雅;14 印度-缅甸冲断裂;15 丽江-小箐河;16 龙门山;17 安宁河-则木河-小江;18 红河;19 南汀河;20 石揭;21 奠边府;22 秦岭-大别;23 银川-吉兰泰;24 山西地堑;25 郟庐;26 大青山;27 张家口-蓬莱;28 南天山;29 北天山

图1 块体模型的轮廓

Fig. 1 Outline of block model

在 10~30 km 断层通过闭锁参数调节,而 30 km 以下断层自由滑动。对于边界不闭合的周边地块,假定其隐含边界离研究区域遥远,因此其构造活动可以忽略。

模拟分两种:一是将地块作为刚性介质,忽略其内部应变,仅估计块体旋转和断层闭锁参数;第二种将地块作为弹性介质,在估计块体旋转和断层闭锁参数的同时,估算其内部应变。前者拟合 GPS 速度场的残差中误差为 1.73 mm/a,后者的拟合中误差为 1.50 mm/a。

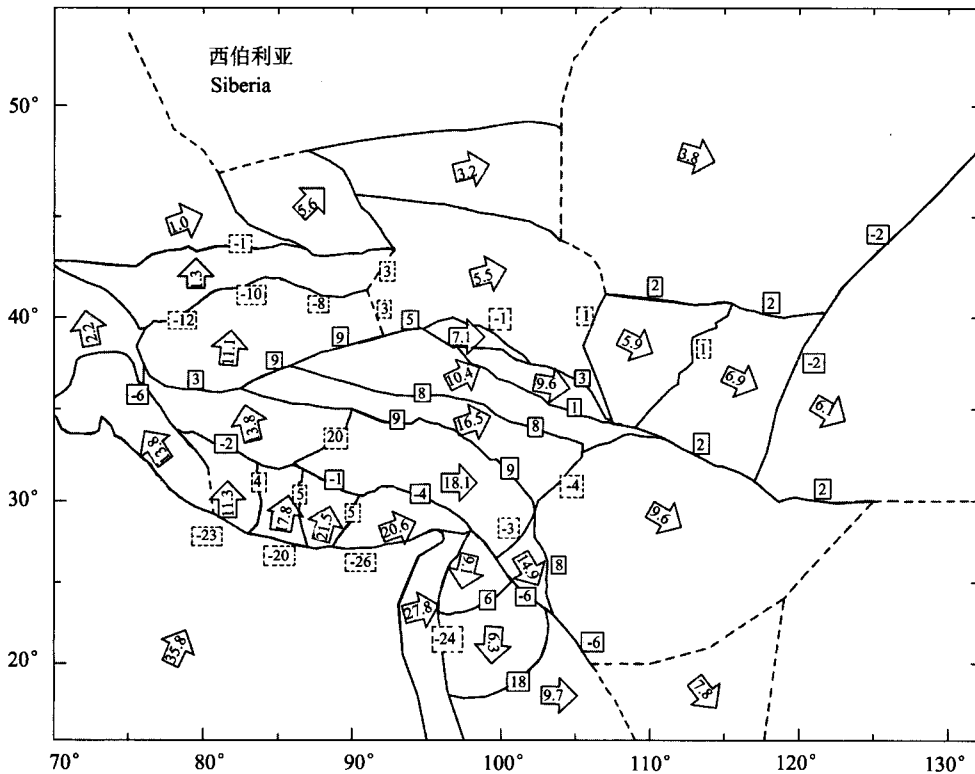
1) 总的看来,在反演中估计内部应变可得到更好的拟合效果,尤其是青藏高原南部地区,如果忽略内部应变则拟合精度变差。而青藏高原以外地区,是否估计内部应变对拟合精度几无影响;

2) 是否估计内部应变对地块欧拉矢量的影响

不大,对边界带断层滑移的估算有一定影响,影响的断层主要是喜马拉雅、南天山、鲜水河,影响幅度大约为 3 mm/a;

3) 应变幅度最大的地区,如青藏高原、天山等,应变率大于  $15 \times 10^{-9}/a$ ,而在华南地区小于  $5 \times 10^{-9}/a$ 。

表 1 是本文模型的结果,包括各块体是否估计内部应变的速度残差的均方根,不估计块体内部应变时的欧拉矢量,内部应变率等结果。图 2 是各块体相对欧亚板块的运动速度和主要边界断层的运动速率,反映了大陆构造运动的主要特征(主要基于不计算块体内部应变的结果),其运动速率的参考基准为西伯利亚块体。图 3 是 GPS 速度场拟合的残差分布图,椭圆代表 67% 的置信区间、基于同时估计内部应变的结果。



注:箭头内数字代表活动地块运动速率,以西伯利亚块体为参考基准;方格内数字代表边界断层的活动速率,虚线方格为正断层或逆断层,数字为正表示拉张,数字为负表示挤压;实线方格为走滑断层,数字为正表示左旋,负表示右旋

图 2 各块体运动速率和主要边界断层的活动速率

Fig. 2 Moving velocity of each block and slip rates of main faults

如图 2 所示,我们得到的活动地块运动速率总体上与文献[11,12]的结果有较好的一致性。例如,华南块体的运动速率为 9.6 mm/a,准噶尔块体为 5.5 mm/a,塔里木块体的运动速率为 11.1 mm/a。可见在青藏高原内部,各块体之间的差异运动也十分明显,高原物质侧向挤出现象比较突出。

我们将本文结果与李延兴<sup>[12]</sup>给出的地块速率进行统计比较,两者差异很小。李延兴<sup>[12]</sup>将中国大陆划分成 10 个地块,模型布局上与我们的不同,且是单个地块独自计算,剔除了边界带上的测站。我们选择其中 6 个定义相近的塔里木、准噶尔、阿拉善、华北、华南和鄂尔多斯地块进行比较,地块运动速率的标准差为 1.7 mm/a,方位的标准差为 15°,结果比较一致。原因可能是这些块体分布于青藏高原周缘地区,地块比较稳定,内部变形不大,相互作用不剧烈、边界活动对地块影响较少。因此尽管我们所用测站更多,地块分割更为细致,可两者差异很小。

现用地块旋转的欧拉矢量推算地块边界处相邻地块的差异速率,作为指示断层长期滑移的估计值,并与第四纪地质速率对比。由于长期的地质速率在

某些断层上差异显著,如阿尔金、喀喇昆仑断层,最大速率超过 30 mm/a,低值仅 4~6 mm/a。基于以往同类研究,我们取其下界比对。我们的结果支持青藏高原的主要活动断层以较低的速率滑动,与文献[2]所采用的第四纪滑移率资料和其使用近 10 年 GPS 速度场计算的断层滑移率基本一致,与文献[27]采用 GPS 数据和地块模型得到的断层滑移率也较一致。例如阿尔金断层中段、东段的左旋走滑速率约为 9 mm/a,喀喇昆仑断层右旋走滑速率约为 6 mm/a,昆仑山断层左旋走滑速率约为 8 mm/a,鲜水河断层左旋走滑速率约为 9 mm/a。这些结果表明我们计算得到的较低的滑移速率与青藏高原内部块体的相对运动趋势是一致的,文献[8,27]也得到了相同结论。

## 5 讨论

GPS 观测可以定量描述亚洲大陆的现今构造变形,而活动地块的相对运动及其边界断层的滑移速率能够简洁、有效地来刻画这些变形特征<sup>[8,27]</sup>。Avouac 和 Tapponnier<sup>[3]</sup>首先将地块运动模型(青藏、塔里木、西伯利亚、印度)用于亚洲大陆活动构造,

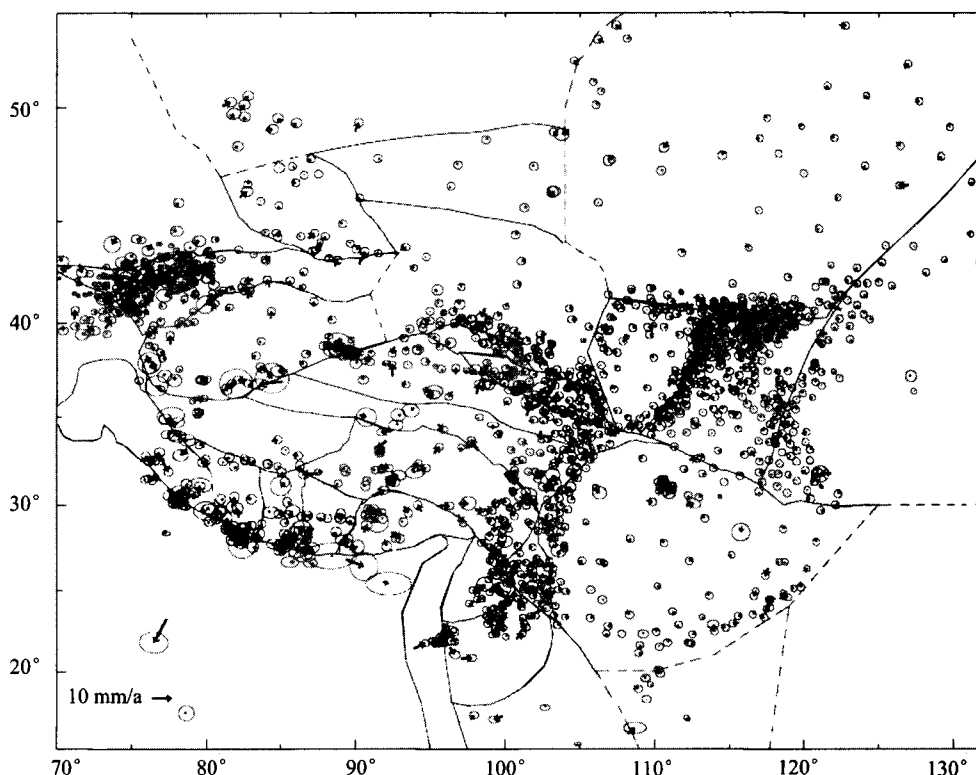


图3 块体模型的 GPS 速度场残差(椭圆代表 67% 的置信区间)

Fig. 3 GPS velocity field residuals of the block model (ellipses represent 67% confident interval)

其中喜马拉雅以北、阿尔金-祁连山-海源断裂以南地区作为一个整体地块,利用为数有限的主要地块边界长期速率,该模型揭示了青藏高原向东挤出,塔里木地块向北北西方向旋转挤压天山等主要特征。但作为一个刚性地块的青藏,要求其南北边界具有大幅度的(20~30)mm/a的走滑速率,与近来 GPS 推算的低速滑移不符<sup>[5]</sup>。如果以该模型为基础模拟 GPS 速度场(区域以外地块划分不变,区域内采用该模型地块边界),整体拟合中误差 2.9 mm/a。说明青藏高原不能作为一个整体地块。实际上, Peltzer 和 Saucier<sup>[28]</sup> 的有限元模型显示,青藏高原内部分布的活动断层如昆仑山、鲜水河、喀喇昆仑-嘉黎断裂必然吸收印度-欧亚大陆的汇聚变形。根据现代 GPS 测量,这些活动断层的滑动速率在(4~10)mm/a,占大陆汇聚速率的(10~30)%<sup>[28]</sup>,因此不能忽略。而借鉴 Replumaz 和 Tapponnier<sup>[4]</sup>、Chen<sup>[19,20]</sup> 提出的主要针对青藏高原地区的地块模型,模拟 GPS 速度场,相应得到中误差分别为 2.4 mm/a、1.9 mm/a。Chen 的模型考虑了具有正断层性质的南北向拉张型地堑和东西向走滑性质的雅鲁藏布江古缝合线,将变形比较突出的拉萨地块分解成 5 个地块,说明地块划分越精细,拟合效果越好。这样地块模型更好地反映了西藏地区南北挤压、东西向拉伸、西藏东部向东挤出、滇西南绕喜马拉雅构

造节点旋转等变形特征, Meade<sup>[8]</sup> 对此进行类似处理,得到了相同结论。

原则上,地块内部不存在与边界相当幅度的应变,但 Chen<sup>[19]</sup> 在模拟 GPS 速度场时,引入均匀应变来解释地块内扣除了整体旋转后的残余移动。其估算的应变达到  $20 \times 10^{-9}/a$  量级。按类似处理,我们改善了 GPS 速度场的模拟精度,且不改变各个地块及其边界运动的估算效果。尽管这样处理采用了应变张量的形式,而且得到的应变张量在应变主轴方向上并无关联性,但这样的处理更多是技术性的,仅作为吸收观测和模型误差的一个手段。通过引入应变参数改善模拟效果原因是多方面的,如数据误差、边界设定有偏差、测站分布不均、地块布局不合理等。从分析结果看,青藏高原内部有数个地块在形式上表现为很大的内部应变,尤其是拉张应变( $20 \times 10^{-9}/a$ )。说明现有条状地块内部仍有明显活动构造,如近南北向的正断层,如果有更多的、分布合理的 GPS 资料,可以通过改善现有地块的分布格局或分解出更小的子地块,改善 GPS 速度场的模拟效果。

王敏等<sup>[11]</sup> 认为青藏地区不存在一个面积超过 100 000 km<sup>2</sup> 的大型地块,鉴于此,张培震<sup>[29]</sup> 等指出,中国大陆地区的构造变形包括青藏高原地区连续变形以及周边华南、塔里木等刚性块体旋转运动

表1 模型的结果

Tab.1 The results of the model

块体名称	测站数	RMS1	RMS2	经度 (°)	纬度 (°)	旋转速度 (°/Ma)	最大主压应变率 $\epsilon_1$ ( $10^{-9}/a$ )	最小主压应变率 $\epsilon_2$ ( $10^{-9}/a$ )	$\epsilon_1$ 的方位角 (°)
AL	13	1.71	1.25	69.9 ± 3.3	33.2 ± 2.5	0.668 ± 0.103	-1.65 ± 5.83	3.43 ± 5.82	-47.6 ± 30.2
AS	100	1.59	1.22	104.5 ± 1.7	22.2 ± 0.8	-0.154 ± 0.017	-0.97 ± 0.86	5.31 ± 0.75	30.4 ± 5.3
AT	9	1.08	0.98	103.2 ± 10.5	33.3 ± 10.8	-0.107 ± 0.083	-0.91 ± 2.18	3.60 ± 2.90	-123.8 ± 17.5
BM	7	2.39	2.12	104.5 ± 3.7	20.1 ± 1.6	-1.563 ± 0.381			
BY	40	1.61	1.29	98.9 ± 0.9	19.6 ± 0.4	-0.583 ± 0.043	-0.23 ± 1.39	13.80 ± 2.41	-82.8 ± 6.0
DZ	25	1.12	1.06	74.5 ± 3.8	48.8 ± 7.6	0.280 ± 0.063	1.47 ± 1.60	3.11 ± 1.67	-64.9 ± 28.4
EQ	65	1.03	0.91	104.0 ± 2.3	20.1 ± 0.8	-0.303 ± 0.043	-5.36 ± 1.95	2.18 ± 2.24	-124.8 ± 10.2
ES	82	1.09	1.05	134.4 ± 2.9	48.2 ± 1.7	0.215 ± 0.013	-0.07 ± 0.54	1.27 ± 0.50	-131.5 ± 12.4
EY	39	1.98	1.78	72.9 ± 7.1	8.2 ± 0.4	-0.249 ± 0.083	-9.79 ± 2.34	12.98 ± 2.59	-35.5 ± 4.6
IC	6	1.67	1.65	102.7 ± 3.2	6.0 ± 0.1	-0.370 ± 0.069	-1.80 ± 2.12	1.96 ± 2.17	-114.8 ± 20.1
IN	58	1.30	1.33	10.6 ± 2.2	24.5 ± 0.1	0.365 ± 0.007	-0.57 ± 0.48	0.00 ± 0.32	-131.5 ± 16.0
KA	34	1.43	1.47	81.8 ± 7.7	35.7 ± 8.2	-0.057 ± 0.027	-1.49 ± 1.21	0.53 ± 0.83	4.2 ± 21.2
LZ	19	1.57	1.38	96.3 ± 1.0	17.2 ± 0.8	-0.910 ± 0.148	2.12 ± 6.00	16.36 ± 9.04	-67.2 ± 22.4
NP	227	1.32	1.26	140.7 ± 7.8	61.3 ± 5.3	0.125 ± 0.012	-0.14 ± 0.35	2.01 ± 0.33	-105.0 ± 6.5
OR	118	1.03	0.96	173.2 ± 31.5	68.8 ± 11.1	0.076 ± 0.015	-0.13 ± 0.57	4.68 ± 0.55	33.5 ± 4.6
PA	23	2.05	1.47	48.9 ± 19.9	27.7 ± 4.9	0.266 ± 0.133	2.38 ± 11.39	15.49 ± 12.39	-33.3 ± 28.4
QD	72	1.83	1.60	103.7 ± 0.6	24.2 ± 0.4	-0.420 ± 0.018	0.98 ± 1.68	4.20 ± 1.11	13.3 ± 19.5
QL	16	1.03	1.09	81.5 ± 19.2	64.3 ± 77.4	0.146 ± 0.124	-11.98 ± 7.50	1.98 ± 5.95	28.2 ± 17.5
QS	73	3.27	2.18	95.2 ± 0.2	23.1 ± 0.2	-1.135 ± 0.027	-1.03 ± 0.63	16.54 ± 0.90	-82.9 ± 2.0
SC	136	1.09	1.07	207.8 ± 8.3	59.9 ± 4.0	0.093 ± 0.003	0.20 ± 0.25	1.21 ± 0.22	32.2 ± 8.9
SG	26	1.84	1.28	71.9 ± 3.5	35.0 ± 3.4	0.716 ± 0.127	-5.58 ± 6.25	6.00 ± 7.08	-7.7 ± 22.5
SI	10	1.44	1.44	0	0	0			
SS	7	1.53	1.27	72.6 ± 21.9	-21.9 ± 6.2	-0.086 ± 0.043	-3.10 ± 4.34	2.37 ± 3.09	-78.8 ± 25.8
SY	36	3.15	1.96	94.4 ± 1.3	22.3 ± 1.0	-0.692 ± 0.081	-20.95 ± 1.92	6.77 ± 1.97	-134.2 ± 1.8
TA	55	1.25	1.32	101.6 ± 0.8	37.5 ± 1.1	-0.417 ± 0.023	-2.29 ± 1.10	-0.56 ± 0.66	-12.0 ± 23.4
TK	31	1.72	1.40	67.3 ± 5.9	39.5 ± 4.5	0.337 ± 0.076	-7.77 ± 2.34	2.44 ± 2.27	-45.1 ± 9.7
TS	183	1.68	1.66	59.7 ± 22.6	38.9 ± 14.1	0.062 ± 0.047	-15.54 ± 3.58	0.02 ± 1.38	3.0 ± 7.2
WQ	20	1.67	1.23	61.2 ± 4.0	37.1 ± 2.6	0.392 ± 0.051	3.82 ± 2.99	7.67 ± 2.45	40.1 ± 16.2
WY	24	1.80	1.36	86.7 ± 2.6	26.2 ± 3.0	-0.479 ± 0.126	-24.59 ± 2.69	-3.58 ± 3.79	-4.5 ± 6.4
XG	16	1.61	1.37	104.3 ± 2.7	12.4 ± 0.4	-0.499 ± 0.095	-6.26 ± 4.32	6.45 ± 6.42	-126.7 ± 14.5
XM	113	1.02	0.94	141.2 ± 12.0	68.2 ± 9.1	0.073 ± 0.009	-1.03 ± 0.25	1.35 ± 0.27	-116.6 ± 4.5

注:RMS1、RMS2 分别为不估计应变参数和估计应变参数时的速度残差的均方根; $\omega$  为负表示顺时针旋转,基于不估计应变率的结果;块体 SI 作为其它块体运动的参考基准,欧拉矢量为 0;块体 BM 内部的 GPS 测站太少,没有估计其应变率,同时也没有估计参考基准块体 SI 的应变率。

的耦合。而我们的模拟表明,青藏高原可以分解为数个小型刚性地块,因此无需耦合模型。我们认为由于所处构造部位不同,承受应变的强弱各异,演化途径相差较大,大陆地区地块有大小之别,如同全球板块也有尺寸差异一样。印度次大陆与亚洲大陆碰撞前,雅鲁藏布江以北的地区本来将是由多个微大陆、岛弧拼合,增生到亚洲大陆的产物。在印度板块低角度俯冲至喜马拉雅之下,以北地区施加挤压剪切作用,其边界力远较菲律宾板块之于华南地块为大,因此缺乏形成类似于塔里木、华南大小的完整地

块的构造条件。这不仅为 GPS 观测、活断层勘测所确认,也得到中强地震的分布特征、壳内低速层分布、以及大地热流活动的佐证。

诚然如 Eangland 和 Molnar<sup>[2]</sup>, 将一个构造区域分割成为数甚多的微型地块,用这些地块的相对运动模拟大尺度速度场在技术上是可能的,但如果需要成百上千地块、应用庞大的运动参数来表述运动过程,在动力学上毫无意义,而且由于地块之间缺乏必要的差异性,给地块定义带来很大复杂性,因此构造上也无价值。区分两类模型的一个重要界限是

地块的空间尺度,一个合理的地块模型必须有合适的数量和尺度。我们认为本文 30 个左右的地块模型是描述亚洲大陆构造变形和 GPS 速度场的较理想模型,就青藏高原而言,10 多个面积大于 200 km × 200 km 的地块可能比较合适。如果将上地壳脆韧转换带(20 km)作为底边界,纵横尺寸比为 1:10;而全部地块看作是岩石圈地块,这样最小纵横比近 1:2。因此借用板块构造概念,描述青藏高原现今变形地块模型,可能主要由上地壳地块(而非岩石圈板块)组成,在更大尺度上,与其说中国大陆变形运动模式是刚性地块旋转与连续变形并存,而不如说是岩石圈微板块和脆性上地壳块体耦合运动。

## 6 结论

利用 GPS 资料建立中国大陆活动地块的运动模型,结果表明中国大陆及邻近地区的构造变形用 30 个左右的块体来描述,比过去的地块模型更能精细反映中国大陆构造变形的特征。在 GPS 观测精度内,由 31 个地块运动学模型整体上较好地反映了中国大陆构造变形的特征。在印度板块的挤压作用下,中国大陆及邻区的活动变形在很大程度上表现为长期的构造块体的旋转和块体边界断层闭锁的弹性作用。模型给出的主要断层滑动速率在青藏高原及周边为(6~18)mm/a,中国东部地区为(1~4)mm/a,与地质长期速率比较一致;模拟表明地块内部变形不过  $10 \times 10^{-9}$ /a,与(50~100)km 宽的边界带局部变形相比,块体内部变形十分有限。这说明块体的旋转运动而非连续分布变形可能是大陆构造的主要活动方式,板块构造原则仍可以用以刻画大陆变形的运动学特征。

### 参 考 文 献

- England P and Molnar P. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults [J]. *Geophys. J. Int.*, 1997, 130:551 - 582.
- England P and Molnar P. Late Quaternary to decadal velocity fields in Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110, B12401.
- Avouac J P and Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20:895 - 898.
- Replumaz and Tapponnier. Reconstruction of the deformed collision zone between India and Asia by backward motion of lithosphere blocks [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(B6), 2285, doi:10.1029/2001JB000661.
- Wang Q, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by GPS measurement [J]. *Science*, 2001, 294: 574 - 577.
- Holt W E, et al. Velocity field in Asia inferred from Quaternary fault slip rates and Global Positioning System observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105:19 185 - 19 209.
- 杨少敏,王琪,游新光. 中国现今地壳运动 GPS 速度场的连续变形分析[J]. *地震学报*, 2005, 27(2):128 - 138.
- Yang Shaoming, Wang Qi and You Xinzha. Numerical analysis of cotemporary horizontal tectonic deformation fields in China from GPS data [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2005, 27(2):128 - 138. (in Chinese)
- Meade. Present-day kinematics at the India-Asia collision zone [J]. *Geology*, 2007, 35:81 - 84.
- 邓起东,等. 中国活动构造基本特征[J]. *中国科学(D)*, 2002, 32(12):1 020 - 1 030.
- Deng Qidong, et al. Basic characteristics of active tectonics of China[J]. *Science in China (D)*, 2002, 32(12):1 020 - 1 030. (in Chinese)
- 张强,朱文耀. 中国地壳各构造块体运动模型的初建[J]. *科学通报*, 2000, 45(9):967 - 972.
- Zhang Qiang and Zhu Wenyao. The initial establishment of the tectonic block motion model of China from space geodetic data [J]. *Science Bulletin*, 2000, 45(9):967 - 974. (in Chinese)
- 王敏,等. 中国大陆地壳运动与活动块体模型[J]. *中国科学(D)*, 2003, 33(增):21 - 33.
- Wang Min, et al. Present-day crustal movement of Chinese mainland and active block model [J]. *Science in China (D)*, 2003, 33(Supp.):21 - 33. (in Chinese)
- 李延兴,等. 中国大陆活动地块的运动与应变状态[J]. *中国科学(D)*, 2003, 33(增):65 - 80.
- Li Yanxing, et al. Movement and strain conditions of active blocks in the Chinese mainland[J]. *Science in China(D)*, 2003, 33(Supp.):65 - 80. (in Chinese)
- McCaffrey R. Block kinematics of the Pacific - North America plate boundary in the southwestern US from inversion of GPS, seismological, and geologic data[J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110, B07401.
- Wallace L M, et al. Subduction zone coupling and tectonic block rotations in the North Island, New Zealand[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, B12406, doi: 10.1029/2004JB003241.
- Savage J C. Viscoelastic-coupling model for the earthquake cycle driven from below [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105:25 525 - 25 532.
- Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1985, 75:1 135 - 1 154.
- Savage J C, Gan W and Svarc J L. Strain accumulation and rotation in the eastern California shear zone [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106:21995 - 22007.



(上接第 82 页)

- 18 张培震, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D), 2003, 33(增): 12-20.
- 18 Zhang Peizhen, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. Science in China (D), 2003, 33(Supp.): 12-20. (in Chinese)
- 19 Chen Q, et al. A deforming block model for the present-day tectonics of Tibet[J]. J. Geophys. Res., 2004, 109, B01403.
- 20 Chen Q, et al. Spatially variable extension in southern Tibet based on GPS measurements[J]. J. Geophys. Res., 2004, 109, B09401.
- 21 Zhang P Z, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. Geology, 2004, 32, 809-812.
- 22 牛之俊, 等. 中国大陆现今地壳运动速度场的最新观测结果[J]. 科学通报. 2005, 50(8): 839-840.
- 22 Niu Zhijun, et al. Contemporary velocity field of crustal movement of Chinese mainland from global positioning system measurements[J]. Science Bulletin, 2005, 50(8): 839-840. (in Chinese)
- 23 Calais E, et al. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994-2002): Implications for current kinematics of Asia[J]. J. Geophys. Res., 2003, 108(B10), Doi: 2501, 10.1029/2002JB002373.
- 24 Paul J, et al. The motion and active deformation of India [J]. Geophys. Res. Lett., 2001, 28(4): 647-651.
- 25 Banerjee P and Bürgmann R. Convergence across the northwest Himalaya from GPS measurements [J]. Geophys. Res. Lett., 2002, 29(13): 301-304.
- 26 Vigny C, et al. Present-day crustal deformation around Sagaing fault, Myanmar [J]. J. Geophys. Res., 2003, 108(B11), 2522, 10.1029/2002JB001999.
- 27 Thatcher Wayne. Microplate model for the present-day deformation of Tibet [J]. J. Geophys. Res., 2007, 112(B1), B01401, 10.1029/2005JB004244.
- 28 Peltzer G and Saucier. Present-day kinematics of Asia derived from geologic fault rates [J]. J. Geophys. Res., 1996, 101: 27 943-27 956.
- 29 Sella G F, et al. A model for recent plate motion velocities from space geodesy [J]. 2002, J. Geophys. Res., 107(B4), 2081, doi: 10.1029/2000JB000033.
- 30 张培震, 等. 中国大陆现今构造作用的地块运动和连续变形的耦合模型[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 748-756.
- 30 Zhang Peizhen, et al. A coupling model of rigid-block movement and continuous deformation: patterns of the present-day deformation of China's continent and its vicinity [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 748-756. (in Chinese)