

中国陆地现今水平形变状况及其驱动机制

陈小斌*

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要 根据 933 个 GPS 测点速度场数据, 利用普通克里金插值和形函数求导原则获得球坐标下中国陆地的应变率场. 通过对所获得应变率场及前人结果的对比研究, 发现中国陆地内部连续形变和块体运动变形模式均有存在. 青藏高原和天山地区的变形以连续变形为主要特征, 构造变形广泛分布于全区域; 华南、准噶尔、塔里木、鄂尔多斯、东北等地块内部变形较弱, 变形主要发生在块体边缘的断裂带上, 表现为较为典型的块体运动的变形模式; 其他如阴山-燕山地块、华北平原地块、鲁东-黄海地块等则介于两者之间. 此外, 还发现中国陆地自西南向东北存在三条较为明显的北西向的膨胀条带. 这些结果表明, 印度板块的北北东向的推挤是中国陆地内部形变的主要推动力, 其不仅造成了青藏高原的隆升以及地壳的水平缩短和垂向增厚, 同时还引起了物质的放射式挤出. 这些挤出的物质, 一部分推动着其他块体的“逃逸”, 在周围环境的联合作用下, 造成中国西部的汇聚压缩和中国东部广泛分布的引张环境和局部复杂的变形状况, 另一部分则沿着川滇地块和滇南地块, 在华南地块和青藏高原之间挤出一条通道, 往东南方面流向缅甸山弧, 填补那里因板块俯冲的弧后拉张所造成的物质空缺.

关键词 GPS 速度场 中国陆地 水平形变场 克里金插值 形函数 动力学

中国地处欧亚板块东南部, 为印度板块、太平洋板块、菲律宾海板块所夹持, 以其为主体的东亚大陆是全球最大的一个弥散边界^[1]. 自上新世(3 Ma)以来, 中国现代地壳运动格局基本未变, 被称为“新构造时期”^[2], 对其运动和形变状况的研究一直是中国乃至国际地学界的热点.

目前, 描述中国陆地“新构造时期”运动和变形特征的主要有两种说法. 一种说法认为以块体运动为主要特征, 变形主要发生在块体相互作用的边界上, 块体内部相对稳定, 形成断块构造^[3,4]. 另一种说法认为东亚大陆的变形可以用重力作用下的连续黏性介质的缓慢流动来描述^[5], 岩石圈内部没有明显的块体划分. 这两派对立的观点反映到中国陆地内部形变场的模式研究上形成以下两种假说: 一是认为

印度板块的挤压主要由青藏高原地壳的广泛增厚来吸收^[5], 而另一派认为印度板块的挤压造成东亚大陆地壳的大范围东向逃逸, 高原地壳的增厚是次要的^[6-8]. 两种假说均有相当多的地质构造证据. 若能获得定量的中国陆地现今水平形变场, 则可进一步对此问题进行论述.

全球定位系统(GPS)是定量研究地壳现今水平运动和构造变形的重要手段, 其观测结果可提供高精度、大范围 and 准实时的地壳运动数据, 为构建准确的中国陆地现今水平形变场提供了基础. 过去十几年来, 在中国陆地分期布设了一大批 GPS 观测台站, 目前已有数批数据和大量的研究成果发表^[9-33], 在中国陆地的块体划分、运动和形变等方面获得了许多极有意义的成果. 但是由于 GPS 台站数量有限, 且分布很

收稿日期: 2006-12-15; 接受日期: 2007-05-22

国家自然科学基金项目(批准号: 40674036)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 40534023)资助

* E-mail: cxh@pku.edu.cn

不均匀,使得资料处理和信息提取存在着较大的不确定性.这一点在利用速度场分布构建形变场时显得格外突出.无论中国陆地还是局部,给出的形变场分布都有较大的差别,需要引入更为先进的处理手段来获得更为可靠的结果.

本文引入地质统计学理论中的普通克里金插值 [34~38] 来处理GPS速度数据,结合有限元中形函数求导原则 [39],获得了球坐标下中国陆地现今水平应变率场,在此基础上对中国陆地现今水平变形特征及其驱动机制进行了详细地讨论.

1 数据处理方法

1.1 球面坐标下的应变率计算公式

地球可近似视为一个球体,地球表面观测的GPS数据都是在地理坐标系下进行的,因此,由GPS速度场计算应变率亦应如此.本文依据张量的坐标变换关系,推得地理坐标系下的应变率计算公式为

$$\begin{cases} \varepsilon_L = \frac{1}{R \cos B} \frac{\partial V_L}{\partial L} - \frac{V_B}{R} \tan B, \\ \varepsilon_{LB} = \frac{1}{2R} \left(\frac{\partial V_L}{\partial B} + V_L \tan B \right) + \frac{1}{2R \cos B} \frac{\partial V_B}{\partial L}, \\ \varepsilon_B = \frac{1}{R} \frac{\partial V_B}{\partial B}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, L, B 为经纬度坐标, R 为地球半径, V_L, V_B 分别为观测速度的经向分量(东分量)和纬向分量(北分量), $\varepsilon_L, \varepsilon_B, \varepsilon_{LB}$ 为二维应变率张量的3个分量.

1.2 克里金插值技术

克里金插值是建立在严格的数理统计基础上的一门空间估值技术,主要用于处理既有结构性又有随机性的空间分布数据,是一种无偏最优的线性估值技术 [34,35],已在地学等领域得到了广泛的应用 [34~37].

假设空间随机函数 $Z(\mathbf{x})$ 在空间位置 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n$ 有观测值 $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$, 则在未知点 $\mathbf{x}_0$ 处,其值 Z_0 可由已知的 n 个量估计

$$Z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i, \quad (2)$$

上式中, λ_i 为待定的加权系数.

克里金插值有多种,本文采用普通克里金方法,这时, $Z(\mathbf{x})$ 在估值空间的均值 μ 被认为是一个未知常量,估值遵循无偏性和最优性原则,由此可得克里金方程组如下

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_{ij} + \mu = \gamma_{i0} \quad (i=1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \end{cases} \quad (3)$$

上式中, γ_{ij} 表示第 i, j 2 个观测点间向量所对应的变异函数 [34~37] 值, γ_{i0} 表示第 i 个观测点到估值点间的向量所对应的变异函数值.这些量可以通过实验变异函数拟合理论模型计算得到.求解(3)式,得到(1)式中加权系数 λ_i ,从而可以估算得到 Z_0^* , 同时还可得到估计方差

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{i0} + \mu. \quad (4)$$

可以看出,变异函数是整个克里金插值技术中最为关键的参量.变异函数定义为随机变量 $[Z(\mathbf{x}_1) - Z(\mathbf{x}_2)]^2$ 的数学期望的一半,描述了数据在空间上的变化程度.对于实测数据,按下式求取实验变异函数

$$\gamma^*(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} [Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x}_i)]^2, \quad (5)$$

式中 $\mathbf{x}_i$ 为空间中某点的位置矢量, $\mathbf{h}$ 为连结 $\mathbf{x}_i$ 和另一点的矢量, $N(\mathbf{h})$ 为数据集中矢量距为 $\mathbf{h}$ 的数据对数目.可见,变异函数既表示了随机函数 $Z(\mathbf{x})$ 在某一点上距离上的变化,也表示了方位上的变化.

实验变异函数给出的是离散结果,但插值中需要得到空间上连续的变异函数值.因此,在得到实验变异函数以后,需利用不同的理论变函数模型进行拟合.变异函数的理论模型有多种 [34,35,37],并可组合使用.

变异函数在空间方位上的变化可用各向异性参数来描述.对于几何各向异性,可通过线性变换转化为各向同性,这时变异函数的空间方位变化可由长轴为 a ,短轴为 b 的椭圆来描述,或者是表征主轴方位的角度 α 和短轴长度的各向异性因子 $\beta, \beta = a/b$ (图1).

实际中一般用尽量少和尽量简单的理论变异函数模型来拟合实验变异函数数据,以提取实验变异函数中的真实信息,而降低冗余信息.

1.3 形函数插值及求导规则

当利用克里金技术将散落的观测点插值到一组矩形网格上以后,利用有限元形函数插值可方便地得到整个区域内任一点的值和导数值,从而按(1)式可进一步求得水平应变率.

如果每个矩形单元四个顶点上的值已知, 则矩形域中任一点处的值及其导数可表示为

$$\begin{cases} Z^* = \sum_{i=1}^4 N_i Z_i, \\ \frac{\partial Z^*}{\partial L} = \sum_{i=1}^4 Z_i \frac{\partial N_i}{\partial L}, \frac{\partial Z^*}{\partial B} = \sum_{i=1}^4 Z_i \frac{\partial N_i}{\partial B}, \end{cases} \quad (6)$$

上式中, N_i 为单元形函数^[39], 由矩形单元的 4 个顶点的坐标值确定; L, B 表示经纬度坐标. 上式实际为双线性插值, 其导数在单元中心处具有二阶精度.

2 中国陆地现今水平应变率场特征及其驱动机制

2.1 GPS 速度场的处理和插值

计算所用的 GPS 速度数据主要来自中国地壳运动观测网络^[29], 在西藏南部和东南沿海地区补充使用了其他网络的资料^[17], 编辑整理后共 933 个测点 (见图 2). 数据处理主要采用 Surfer8 软件, 该软件提供了众多的变异函数理论模型以及各种克里金插值方法.

在实验变异函数的计算过程中, 最大的滞后距为 5° . 图 1 展示了观测速度 2 个分量的变异函数及其拟合情况. 其理论模型均为纯块金模型^[36]加一个线性模型^[36]的套合, 可以看出拟合效果是令人满意的.

从变异函数图上可以得到其他插值方法所不能给出的有用的信息. (1) 中国陆地速度场在空间上的

变化有一定程度的各向异性, 其中东分量为 1.989, 北分量为 2.313, 两者的主轴方向为 150° 左右 (以东方向为 0° 角, 逆时针为正). 变异函数的各向异性椭圆表明, 中国陆地速度场变化最快的方向为北东 30° 左右, 表明这个方向上构造变形最为强烈, 承受着最大的构造力. (2) 东分量的块金值为 $0.0172 \text{ cm}^2/\text{a}^2$, 北分量的块金值为 $0.0145 \text{ cm}^2/\text{a}^2$, 它们主要反映了观测误差的影响; 其两倍再开方, 分别为 0.185 和 0.170 cm/a , 可视为参与处理的 GPS 速度场的总体平均误差.

利用上述理论变异函数, 按 0.5° 间隔的网格划分, 对观测速度进行插值, 得到了分布均匀的中国陆地速度场, 如图 2 所示. 可见插值结果很好地保持了观测数据的特征. 根据 (4) 式的计算结果表明绝大部分估值标准偏差小于上述由块金值计算的 0.185 和 0.170 cm/a , 尤其是在测点密集区域, 估值标准差很小, 几乎为 0.

2.2 中国陆地现今水平应变率场特征

在速度插值的基础上, 利用形函数求导法则, 可以得到中国陆地水平应变率场分布, 见图 3, 4 所示. 其中图 3 为最大剪应变率和膨胀率分布图, 图 4 为主压应变率和主张应变率分布图, 它们包含了中国陆地现今构造水平形变的主要信息. 本文中, 应变率单位统一为 $10^{-15}/\text{S}$ (约为 $3 \times 10^{-8}/\text{a}$).

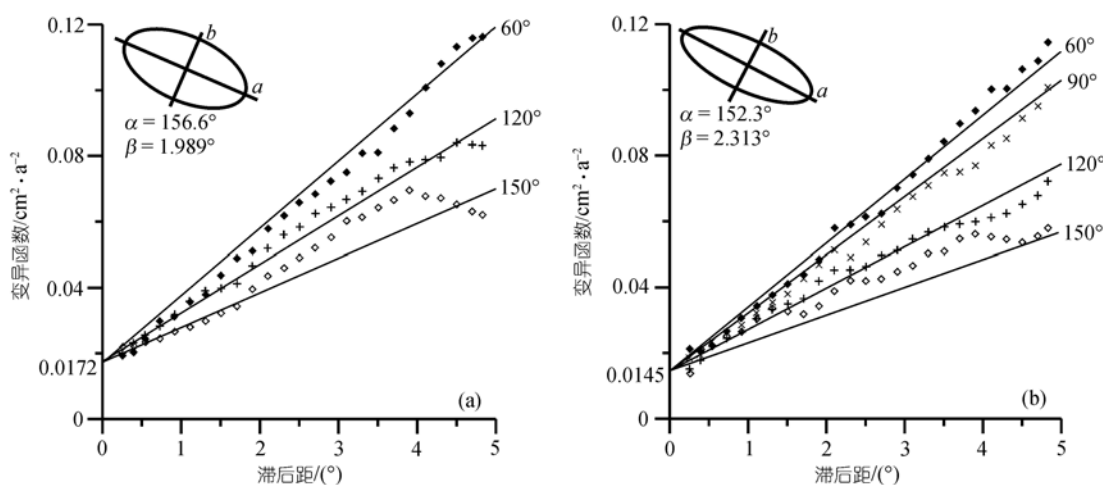


图 1 实验变异函数及其理论模型的拟合

不连续符号为实验变异函数, 实线为拟合后的线性理论模型, 左上角为理论模型的几何各向异性椭圆图, 其长轴表示变异性慢. (a) 为速度东分量的变异函数, 为显示清楚, 其中只绘制了 3 个方向的实验变异函数及其拟合; (b) 为速度北分量的变异函数, 其上绘制了 4 个方向的实验变异函数及其拟合

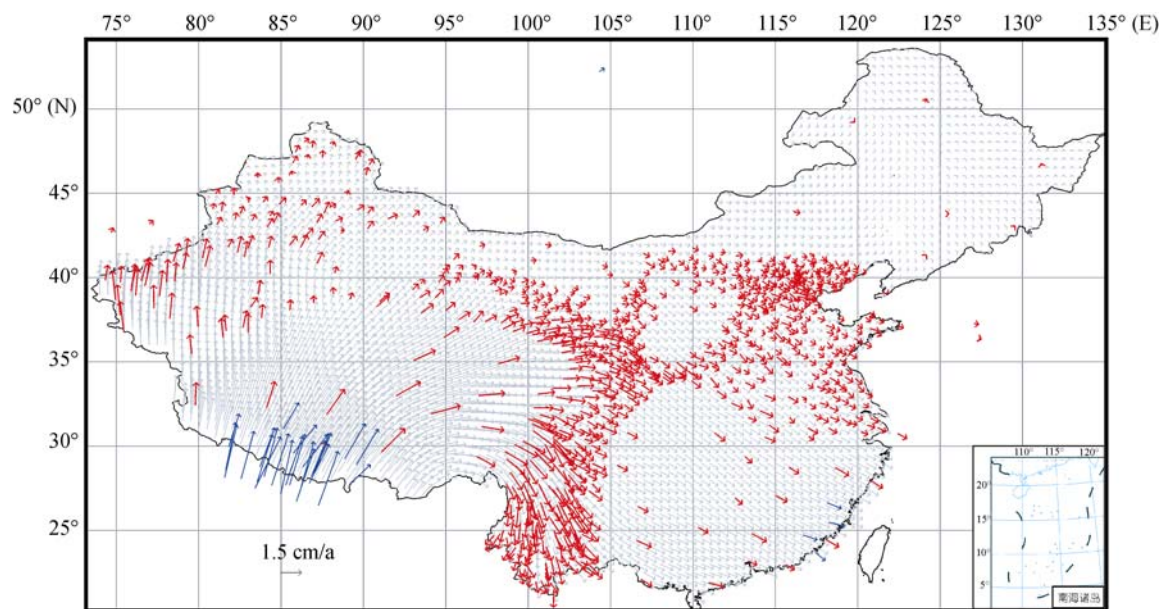


图2 克里金插值得到的速度场与实测数据的比较

红色为地壳运动观测网络数据^[20](901个), 蓝色为补充的文献^[9]中的数据(32个), 共933个, 灰色箭头为插值结果, 按 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格划分

从图3, 4可以看出, 本文计算的中国陆地的水平应变率场既有很好的规律性, 又有较为精细的分辨率。以南北地震带为界, 中国西部的应变率场明显强于中国东部。最大剪应变率主要集中于青藏高原和天山造山带2个区域, 其边界地带为最大剪应变率的显著梯度带, 与大规模的走滑活动断层相对应。最大剪应变率最大值出现在喜马拉雅造山带和鲜水河断裂带, 最大达1.5; 另一最大剪应变率高值区为天山造山带西缘, 最大超过1.0。中国东部最大剪应变率普遍较小, 最大值不超过0.5。

中国陆地存在3个总体呈北西-南东向分布的主要的膨胀条带, 且由西南向东北强度越来越弱。第一条膨胀区从塔里木盆地中部开始, 横跨阿尔金断裂中部, 经柴达木、巴颜喀拉、羌塘等地块进入川滇地区, 并与华南地块西部的部分地区相连, 为中国陆地最为显著的膨胀形变区; 第二条膨胀区域包括阿拉善地块和鄂尔多斯高原的大部分地区, 华北平原地区以及华南地块的北部和东北部地区, 其中在华北平原地区分布复杂, 与收缩区互相切割, 形成局部北北东走向的条带; 第三条膨胀区分布在东北地区, 但其膨胀率值很小, 接近于0, 结合最大剪应变率和主应变率结果, 可知东北地块变形很小, 地壳非常稳定。除了这三条大型膨胀条带以外, 准噶尔地块的中部, 拉萨地块南部也存在局部的强膨胀区, 其展布条带

亦呈北西-南东走向。高收缩区主要分布在喜马拉雅地区和天山地区西缘。

中国西部的主应变率具有较好的规律性。青藏高原地区最大主压应变率值出现在喜马拉雅和川滇地区东部, 约2.0, 最大主张应变率出现在鲜水河断裂带地区, 超过2.0。由西南向东北, 主压应变率方向由近南北转为北北东最后转为北东向, 由西北向东南, 主压应变率方向则由北北东转为北东再转为东西最后转为南东向; 主张应变率方向由西向东偏转方式为北西西→北西→南北→东西→南东, 整体表现为明显的顺时针旋转。天山地区则为另一主压应变率高值区。其西端主压应变率最大超过1.5, 主张应变率很小, 接近于0, 表现出强烈的压缩环境。由西向东, 主压应变率方向由北北西向南北最后转向北东方向, 且其值越来越小, 至东部哈密地区已减至为0; 主张应变率东部强于西部, 但都很小。

从图3, 4还能看到应变率的局部变化。如青藏高原由西南向东北存在3个较为明显的最大剪应变率高值条带。张进等^[40]研究了青藏高原西、中、东的分段性, 尽管其分段位置与本文给出的结果不同, 但都反映了青藏高原内部不仅存在由南而北的构造分块特征, 可能还存在跨越各块体的近南北走向的现代构造变形特征。此外, 面膨胀率和主应变率也反映出一些块体内部形变的不均匀性。

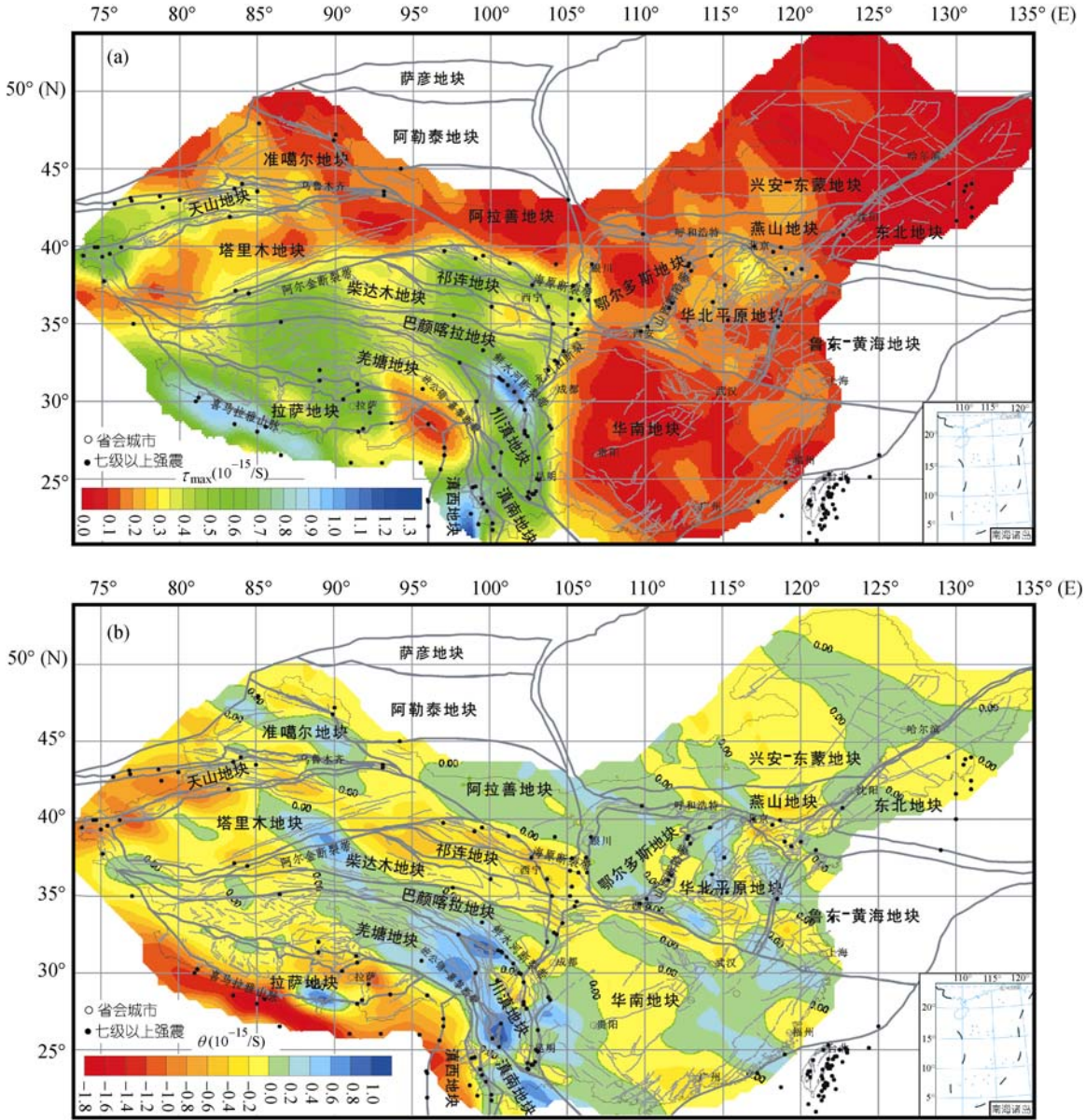


图 3 中国大陆的最大剪应变率分布(a)和面膨胀率分布(b)

面应变率为正表示膨胀，为负表示收缩；粗灰色实线为活动地块边界 [27]，细灰色实线为断层；黑点为公元后至 2001 年史载中国 7 级以上强震分布

上述应变率场的分布与 I 级活动块体分布 [24]有着较好的一致性。青藏高原及其周缘地区构成了中国大陆最显著的高应变率区，与青藏块体相对应；西域块体中，近来复活的天山地块西部亦有较高的应变率，其他各地块如准噶尔、阿拉善、塔里木等属于稳定的地块，应变率值较小。中国东部地区，各地块之间的应变率分界线不明显，但可看出华北平原地块北部及燕山地块地区存在局部相对高应变率区，而东北、华南、鄂尔多斯等稳定的活动地块的应变率值很小。

王敏等 [29]采用本文几乎相同的数据集，从块体的刚性运动出发，通过假设统计检验，得出了中国大陆 9 个独立的块体，其结果与本文给出的应变率分布具有更好的一致性。如中国东部内部块体间的界线较为模糊，华北和华南、东北和燕山不能区分为独立的块体，鄂尔多斯与岷山之间也合为一个块体。此外，跨越巴颜喀拉、柴达木、祁连 3 地块东部的西宁地区却可独立为一个刚性强的块体。这些都与张培震等所划分的活动块体有出入，而与本文结果非常一致。

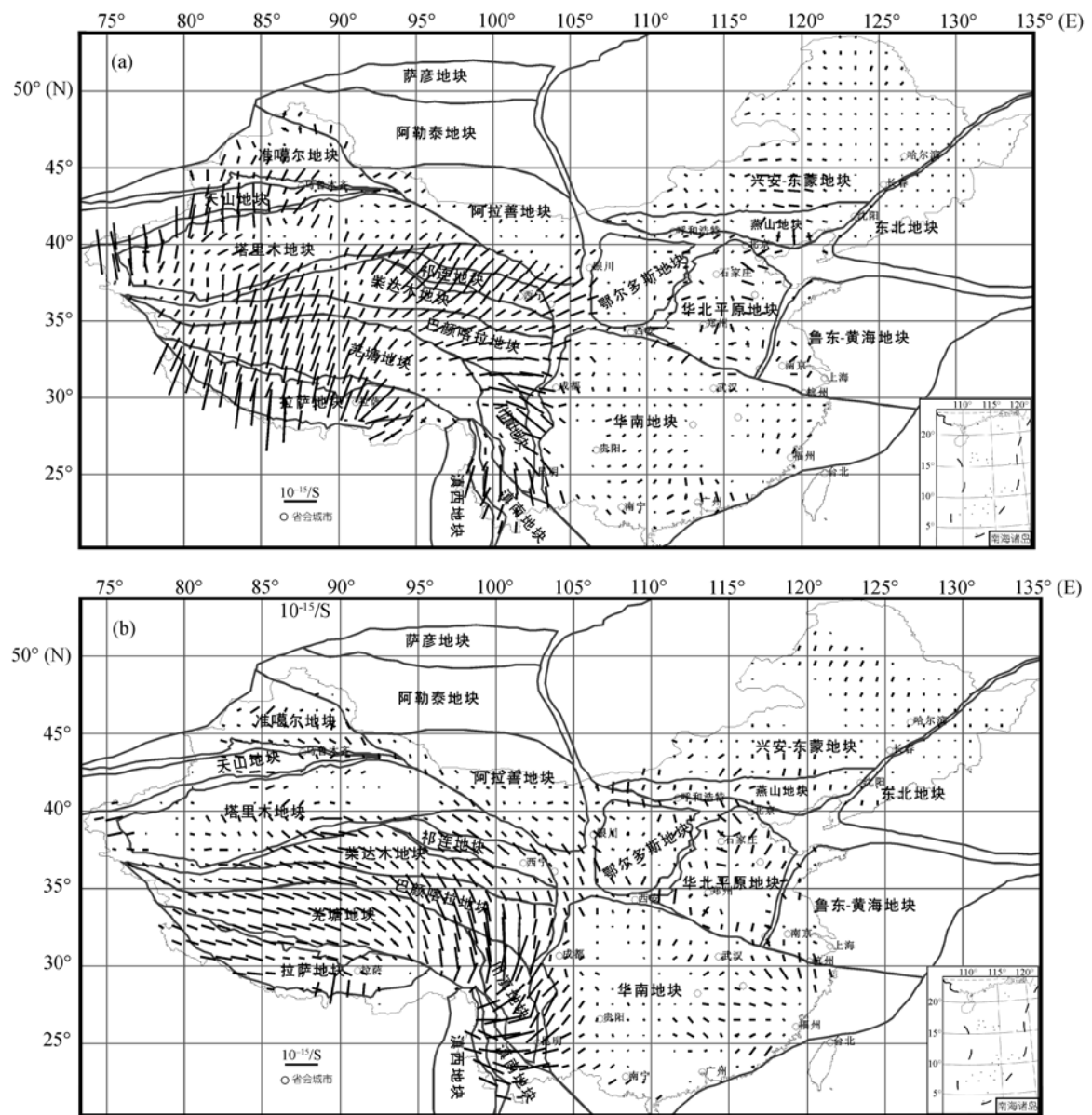


图 4 中国陆地的主应变率分布
(a) 主压应变率; (b) 主张应变率. 为显示清楚, 按 1°间隔绘制. 粗灰色实线为活动地块边界 ^[27]

2.3 与前人计算结果的比较

利用 GPS 数据计算中国陆地现今水平应变率场, 前人已做过许多工作. 尽管对于中国陆地形变场的主要特征都有所把握, 但因为所采用的数据或解算方法不同, 相互之间存在较大的差别. 下面将前人一些研究结果与本文结果逐一进行比较. 由于细节上差别较多且不易说明, 以下将主要介绍主要的或明显的差别.

黄立人等 ^[13] 利用 1994 和 1996 年两次 GPS 测量

共 22 个测点, 采用距离倒数加权插值法计算了中国陆地的应变率参数, 得到了中国陆地的水平运动和形变的宏观图像. 但由于所用测点太少, 他们不能给出更细致的形变特征. 在其结果中中国陆地活动断裂带最强烈的边界带是西昆仑断裂和阿尔金断裂, 这与其后许多研究及本文结果不相符.

杨国华等 ^[18] 利用 375 个观测点资料, 采用三维多核函数逼近法求解应变率参数 ^[10], 获得的应变率总体图像与本文一致, 但存在一些局部的差别. 如尽管他们认为青藏高原由南而北表现为压-张-压的应变

特征,但同时认为青藏高原内部以张为主,周缘以收缩为主.从本文的面膨胀率(图 3(b))上看,青藏高原中部有一条显著的北西向张性区横跨青藏高原.此外,杨国华等^[18]计算的结果中,塔里木、天山和准噶尔地块整体表现为不太显著的面收缩,而本文图 3(b)和图 4 中清楚地显示,在准噶尔和塔里木地块的中部存在着甚为明显的张性区,而天山地块的西部大部分地区表现为强压缩区.

沈正康等^[22]采用连续滑移回归的最小二乘求解算法,根据台站与插值点的距离和一个平滑因子来确定最终的加权系数,并由指数函数的形式表示出来.最优化策略通过平滑因子的优化选取来实现.这种估值方法能够根据台站的疏密来自适应调整加权系数,但其插值结果具有最优性而不满足无偏性要求.他们所得的应变率场的主要特征与本文结果是一致的,但无论是最大剪应变率还是面膨胀率均不如本文更有规律性.

江在森等^[27]采用最小二乘配置法获得了中国陆地水平应变场.在最小二乘配置法中,利用经验协方差函数来确定高斯型协方差函数理论模型,与 Kriging 法有相似之处.但该方法没有考虑协方差函数随空间方位的变化,协方差函数也不如变异函数有着更广泛的适用范围,因此,理论上可视为克里金插值的特例.江在森等^[27]的计算结果与本文结果在很多方面是相似的,但其面膨胀率结果规律性不够强,不像本文那样呈现明显的北西向条带展布.另外,他们的结果中青藏高原中部大部分为张性区,而本文中占不到 1/3.

李延兴等^[31]提出弹性运动方程法来整体描述块体的刚性运动和形变.在应变率计算方面,他们采用了两种方案:均匀应变和线性应变.通过对速度场的最小二乘拟合来整体解算块体的欧拉极和形变参数.此方案对于提高欧拉极的精度无疑是有效的,但其关于二级活动块体(张培震等^[24])中应变率线性变化的假设过于简单.因此,尽管其主应变率方向显示了中国陆地的主要形变特征,但其应变率分布图像与本文研究结果及众多其他研究结果差别较大.

杨少敏等^[33]通过查阅大量已有文献,共收集到 1245 个测点数据,将其转换到统一的坐标系下后,采用双三次样条函数模拟方法按 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的间隔求解了中国陆地现今水平应变率场.由其给出的结果看,各种

应变率尤其使主应变率结果规律性不是很强.在喜马拉雅边界带,其所解算的主压应变率方向为北北西向,而本文及大部分其他研究结果为北北东向;在中国东部地区,其结果中东北地区具有较为明显的形变,而本文结果则显示华北平原北部构造形变相对较强,而东北地区基本上不存在形变.

2.4 中国陆地现今构造变形模式及其动力学成因

在印度板块北北东向的强力挤压和其他大构造块体的联合作用下,中国陆地内部变形强烈,地震成片分布,呈现出异常复杂的特征.这种复杂的形变状况,是以整体的连续变形还是以分块运动为主要特征?问题的焦点集中于青藏高原的动力学研究,引起了垂向增厚和侧向挤出的两大学说的激烈争论.张培震等^[21]根据 GPS 观测结果认为印度板块的推进速度 90% 为高原的垂向增厚所吸收,同时认为青藏高原内部存在以玛尼-玉树-鲜水河断裂和祁连山中部为中心的两个地壳物质东流带,整体形变存在一定的块状结构;王敏等^[29]则认为除了边缘带以外,青藏高原的内部变形广泛连续地分布于全区域;甘卫军等^[30]认为碰撞挤压所造成的高原内部物质向东“逃逸”主要集中在玛尼-玉树-鲜水河断裂和喀喇昆仑-嘉黎断裂之间宽约 400 km 的羌塘地块的东半部,表现为明显的塑性流滑而非刚性挤出;汪一鹏等^[41]通过数值模拟和岩石圈流变强度的研究,认为青藏高原中部存在着一定程度的向东挤出运动,并对中国的东部有一定的推挤作用,但远远达不到侧向挤出模式所设想的大陆逃逸的规模.

对比前人研究成果和本文结果,可以得到中国陆地构造形变模式的新图像.从板块级的宏观方面来看,中国陆地整体表现为连续的高形变区域,是全球最大的弥散带^[1].然而,对于中国陆地本身而言,其内部形变也存在较强的不均匀性,连续形变和块体运动变形模式均有存在.青藏高原和天山地区的变形以连续变形为主要特征,构造变形广泛分布于全区域;华南、准噶尔、塔里木、鄂尔多斯、东北等地块内部变形较弱,变形主要发生在块体边缘的断裂带上,表现为较为典型的块体运动的变形模式,其他如阴山-燕山地块、华北平原地块、鲁东-黄海地块等则介于两者之间,既有一定的连续变形也有一定的块体运动特征.

动力学方面,变异函数的各向异性特征、主压应

变率方向以及显著的北西—南东向展布的面膨胀率均表明中国遭受了北北东或北东向强力挤压, 而面膨胀率由西南向东北逐渐减弱的特征则更清楚表明该挤压力主要来自西南部的印度板块北北东向的推挤, 印证了前人的结果^[42]. 最大剪应变率主要集中在青藏高原全境及其周边大型走滑断裂带上, 表明在受到印度板块的强力推挤以后, 形变广泛分布于青藏高原全境, 并造成物质向东南和北西向逃逸. 在西部, 由于哈萨克—西伯利亚地盾的阻挡, 物质北西向的流动造成强烈的汇聚挤压环境; 而在东部, 东构造结对东流的物质也存在较强的阻挡作用, 造成物质滞留堆积及其附近的强收缩环境, 向东, 东流的物质在受到华南地块的阻挡后折向东南, 沿川滇地块和滇南地块流向缅甸山弧, 填补由于板块的俯冲拉张作用^[43]而出现的物质空缺. 高原中部显著的膨胀带即为此物质东流的拉张表现. 尽管整个膨胀条带贯通青藏高原中部, 但有着明显扩张形变的地区主要集中在羌塘地块的东部, 即鲜水河断裂和嘉黎断裂之间, 与甘卫军等^[30]的研究结果一致. 这条东南流出的物质构成青藏高原东部侧向挤出的一部分. 青藏高原东部侧向挤出的另一部分, 就是对中国东部地区的推动作用. 总体上北西—东南向的面膨胀率表明印度板块的北东向的推挤宏观上仍起着支配作用, 在西伯利亚地盾以及东部板块的联合作用下, 推动着中国东部块体向南东东方向运动. 但在中国华北地区, 局部明显的北北东走向条带和相对强的剪切形变则表明来自其他方面的作用如深部热作用等可能更为重要.

3 结论与讨论

本文利用 933 个 GPS 测站速度场拟合得到了变异函数, 以此为基础研究了台站间的空间变异性、观测数据在空间上的各向异性及误差, 然后利用普通克里金插值和形函数求导原则获得球坐标下中国陆地的应变率场. 结果表明, 在中国陆地内部, 以南北地震带为界, 西部的应变率场明显强于东部. 最大剪应变率主要集中于青藏高原和天山造山带两个区域, 其边界地带为最大剪应变率的显著梯度带. 面膨胀率分布上存在 3 个总体呈北西—南东向展布的主要的膨胀条带, 由西南向东北, 膨胀率越来越小. 中国西部的主应变率具有较好的规律性, 而东部规律性较弱. 应变率场的分布特征表明, 中国陆地内部连续形

变和块体运动变形模式均有存在. 青藏高原和天山地区的变形以连续变形为主要特征, 构造变形广泛分布于全区域; 华南、准噶尔、塔里木、鄂尔多斯、东北等地块内部变形较弱, 变形主要发生在块体边缘的断裂带上, 表现为较为典型的块体运动的变形模式; 其他如阴山—燕山地块、华北平原地块、鲁东—黄海地块等则介于两者之间.

通过对应变率场的分析以及与前人结果的对比研究, 本文认为印度板块的北北东向的推挤是中国陆地构造变形的主要驱动力. 其不仅造成了青藏高原的隆升以及地壳的水平缩短和垂向增厚, 同时还引起了物质向高原周边做放射状的“侧向挤出”. 这些挤出的物质, 一部分推动着其他块体的“逃逸”, 在其他板块或深部物质运动的联合作用下, 造成中国西部的汇聚压缩环境和中国东部广泛分布的引张和局部复杂的变形状况, 另一部分则沿着川滇地块和滇南地块, 在华南地块和青藏高原之间挤出一条通道, 往东南方面流向缅甸山弧, 填补那里因板块俯冲的弧后拉张所造成的物质空缺. 因此, 缅甸山弧的弧后拉张作用也是青藏高原物质东南流动的不可缺少的动力因素之一. 至于侧向挤出作用在整个印度板块与欧亚板块的碰撞过程中占有多大的份额, 则需要进行非常仔细的计算后才能获得.

此外, 从本文的研究可以看到, 克里金插值技术非常适合于处理类似于 GPS 速度这样既有结构性又有一定的空间随机性的观测数据. 变异函数既考虑了观测数据随距离的变异型又考虑了随方向的变异性, 与克里金插值一起为研究空间数据分布提供了一种基本的手段. 但需注意的是, 本文在进行克里金插值时对整个中国陆地采用了相同的变异函数. 由于中国陆地在一定程度上存在分块变形特征, 不同的地块中采用不同的变异函数应更为合理. 这将在进一步的工作中完善.

致谢 本文的研究工作得到了北京大学臧绍先教授的指点, 中国地震局地质研究所王敏博士提供了中国地壳运动观测网络的 GPS 数据, 两位评审专家的建议对本文的改进很有帮助, 在此一并表示衷心感谢.

参 考 文 献

- 1 Gordon R G. The plate tectonic approximation: plate nonrigidity, diffuse plate boundaries, and global plate reconstructions. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1998, 26: 615—642^[DOI]

- 2 马杏垣, 宿俭, 吴大宁. 中国的活动块体运动与构造变形. 见: 国家地震局地质研究所, 编. 现代地壳运动研究(3). 北京: 地震出版社, 1987. 1—8
- 3 张文佑, 叶洪, 钟嘉猷. “断块”与“板块”. 中国科学 A 辑, 1978, (2): 195—211
- 4 张文佑, 断块构造导论. 北京: 石油工业出版社, 1984. 1—23
- 5 England P, Molnar P. Active deformation of Asia: from kinematics to dynamics. *Science*, 1997, 278: 647—650[DOI]
- 6 Tapponnier P, Peltzer G, Ledain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insight from simple experiments with plasticine. *Geology*, 1982, 10: 611—616[DOI]
- 7 Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in Central Asia. *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 895—898
- 8 Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 2001, 294: 1671—1677[DOI]
- 9 Shen Z K, Jackson D D, Ge B X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. *J Geophys Res*, 1996, 101: 27957—27980[DOI]
- 10 张希, 江在森, 张四新. 借助最小二乘配置整体解算地壳视应变场. 地壳形变与地震, 1998, 18(2): 57—62
- 11 Shen Z K, Zhao C K, An Y, et al. Contemporary crustal deformation in east Asia constrained by Global Position System measurements. *J Geophys Res*, 2000, 105: 5721—5734. [DOI]
- 12 Zhu W Y, Wang X Y, Cheng Z Y, et al. Crustal motion of Chinese mainland monitored by GPS. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2000, 43(4): 394—400
- 13 黄立人, 王敏. 中国陆地现今地壳水平运动. 地震学报, 2000, 22(3): 257—262
- 14 杨国华, 赵国坤, 韩月萍, 等. 应用 GPS 技术检测山西断裂带的水平运动. 地震学报, 2000, 22(5): 465—471
- 15 马宗晋, 陈鑫连, 叶叔华, 等. 中国陆地现今地壳运动的 GPS 研究. 科学通报, 2001, 46(13): 1118—1120
- 16 王琪, 张培震, 牛之俊, 等. 中国陆地现今地壳运动与构造变形. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(7): 529—536
- 17 王琪, 张培震, 马宗晋, 等. 中国陆地现今构造变形 GPS 观测数据与速度场. 地学前缘, 2002, 9(2): 415—429
- 18 杨国华, 李延兴, 韩月萍, 等. 由 GPS 观测结果推导中国陆地现今水平应变场. 地震学报, 2002, 24(4): 337—347
- 19 杨少敏, 游新兆, 杜瑞林, 等. 用双三次样条函数和 GPS 资料反演现今中国陆地构造形变. 大地构造与地球动力学, 2002, 22(1): 68—75
- 20 张培震, 王琪, 马宗晋. 中国陆地现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块. 地学前缘, 2002, 9(2): 430—441
- 21 张培震, 王琪, 马宗晋. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场. 地学前缘, 2002, 9(2): 442—450
- 22 沈正康, 王敏, 甘卫军, 等. 中国陆地现今构造应变率场及其动力学成因研究. 地学前缘, 2003, 10(特刊): 93—100
- 23 张培震, 王敏, 甘卫军, 等. GPS 观测的活动断裂滑动速率及其对现今大陆动力作用的制约. 地学前缘, 2003, 10(特刊): 81—92
- 24 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国陆地的强震活动与活动地块. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(增刊): 12—20
- 25 黄立人, 王敏. 中国陆地构造块体的现今活动和变形. 地震地质, 2003, 25(1): 23—32
- 26 马宗晋, 张培震, 任金卫, 等. 从 GPS 水平矢量场对中国及全球地壳运动的新认识. 地球科学进展, 2003, 18(1): 4—11
- 27 江在森, 马宗晋, 张希, 等. GPS 初步结果揭示的中国陆地水平应变场与构造变形. 地球物理学报, 2003, 46(3): 352—358
- 28 李延兴, 杨国华, 李智. 中国陆地活动地块的运动与应变状态. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(增刊): 65—81
- 29 王敏, 沈正康, 牛之俊, 等. 现今中国陆地地壳运动与活动块体模型. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(增刊): 21—32
- 30 甘卫军, 沈正康, 张培震, 等. 青藏高原地壳水平差异运动的 GPS 观测研究. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(1): 29—35
- 31 李延兴, 李智, 张静华, 等. 中国陆地及周边地区的水平应变场. 地球物理学报, 2004, 47(2): 222—231
- 32 牛之俊, 王敏, 孙汉荣, 等. 中国现今地壳运动速度场的观测结果. 科学通报, 2005, 50(8): 839—840
- 33 杨少敏, 王琪, 游新兆. 中国现今地壳运动 GPS 速度场的连续形变分析. 地震学报, 2005, 27(3): 128—138
- 34 孙洪泉, 编. 地质统计学及其应用. 北京: 中国矿业大学出版社, 1990. 31—125
- 35 王家华, 高海余, 周叶, 编著. 克里金地质绘图技术——计算机的模型和算法. 北京: 石油工业出版社, 1999. 39—107
- 36 牛文杰. 三维数据场可视化克里金建模及其算法的理论和应用研究. 博士学位论文. 北京: 北京航空航天大学, 2002. 35—45
- 37 Clayton V D, Andre G J. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide New York. Oxford: Oxford University Press, 1992. 1—114
- 38 PAN Guo-Cheng. 地质统计学中的估值技术和条件模拟. 何凯涛, 辜华良, 译. 世界地质, 1997, 16(3): 83—100
- 39 金建铭, 著. 电磁场有限元方法. 王建国, 译. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998. 51—95
- 40 张进, 马宗晋. 青藏高原西、中、东的分段性及其意义. 地质学报, 2004, 78(2): 218—227
- 41 汪一鹏, 沈军, 王琪, 等. 川滇块体的侧向挤出问题. 地学前缘, 2003, 10(特刊): 188—192
- 42 臧绍先, 吴忠良, 宁杰远, 等. 中国周边板块的相互作用及其对中国应力场的影响——II. 印度板块的影响. 地球物理学报, 1992, 35(4): 428—440
- 43 许忠淮. 东亚地区现今构造应力图的编制. 地震学报, 2001, 23(5): 492—501