

# 汶川地震孕震机理的研究及其对地震预报的启示

朱守彪

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

**摘要:** 2008年5月12日汶川8.0级大地震突发在现今并不活动的龙门山断裂带上,引起社会及学术界的巨大反响,该地震的孕震机理及如何预报问题更引起广泛关注。本文试图从纵横两个侧面来研究汶川地震发生的机理,即:先利用GPS资料研究地表的变形场,然后运用数值方法对横跨龙门山断裂带的一个剖面进行模拟。文中的计算结果显示:①汶川地震前龙门山断裂带及附近地区地表的主应变率的方位与该区域的地应力方位基本一致,但形变量值很小,表明断层处于闭锁之中;②对地震发生过程进行有限元模拟的结果,显示等效应力及变形能量密度在空间分布由分散状态逐步向龙门山地区集聚,龙门山断裂带上地震复发周期约为3163年。因此,根据前人的研究结果及本文的研究认为汶川大地震的动力成因可能为:随着印度洋板块对欧亚大陆的不断挤压碰撞,青藏高原隆升后形成的物质东流在向东运动过程中由于受到稳定的四川盆地的阻挡,一部分东流物质在川西地区囤积,造成龙门山隆升;高角度、铲状的龙门山断层面上正应力随着川西高原的向东运动而不断增大,再加上断层附近介质刚性大,这就导致该断层的闭锁程度增高;但另一方面随着高原东流物质的不断向东运动,龙门山下部地壳囤积的东流物质不断地向斜上方推挤龙门山断层面上盘,这样会导致龙门山断裂带上的剪应力越来越大;当剪应力超过摩擦强度时,断层解锁发生地震。最后,针对这种地震机理的新型地震,提出了今后关于地震预报的几点思考。

**关键词:** 汶川地震; GPS观测; 有限单元; 地震预报

**中图分类号:** P315.72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-8047(2009)01-0010-10

## 前言

2008年5月12日14时28分,在青藏高原东缘的龙门山断裂带上发生了汶川 $M_s8.0$ 强烈地震。地震造成的地表破裂带长度达约250 km,最大垂直及水平向错距分别约为6.2 m和4.9 m。该地震给四川及周边省份造成了巨大的人员伤亡及财产损失。那么,如此巨大的地震其前兆现象为什么不特别明显呢?我们回顾性地考察了汶川地震前各种地震前兆,如地表形变(GPS及水准测量)、地下流体、地震活动性、重力和地磁电等,在地震之前均发现没有明显异常变化;该地区历史上只发生过3次6~6.5级强震,而且龙门山断裂带晚第四纪构造活动速率很低,在地震年度会商中一般将该地区视为不大可能发生强震的区域对待。因此,破坏性巨大的汶川地震为我们提供了研究新地震类型<sup>[1]</sup>的机会。

在“不易”发生大地震的地区却突然发生了如

此强烈的地震,其孕震机理是什么?能量是通过什么方式积累起来的?为什么地震发生的周期这样漫长(约3000年)?许多的科学问题摆在我们面前,等待我们去研究,找出答案。

本研究从纵横两个侧面对汶川地震发生的机理进行研究,首先利用GPS资料研究地表的变形场,而后运用数值方法对横跨龙门山断裂带的剖面进行模拟,研究汶川地震的动力成因,最后从地震的前兆特征及孕震机理来分析地震预报的复杂性。

## 1 GPS观测结果及地应变场

### 1.1 GPS观测

青藏高原及周边地区自20世纪90年代布设GPS观测站点以来,已积累了丰富的GPS测点速度资料。图1给出了青藏高原及邻区在1999~2007年间相对于欧亚板块的GPS观测结果,由图可见,

收稿日期: 2009-03-02

作者简介: 朱守彪(1964-),男,博士,教授,主要从事地球动力学及地震预测研究。

基金项目: 基本科研业务专项(批准号: ZDJ2007-6, ZDJ2007-1, ZDJ2008-39)资助。

GPS 测点在该区的分布稀疏不均, 比如青藏高原东北缘及川滇部分地区站点多、密度大, 而四川盆地及其东南部地区站点稀疏。图 1 还显示, GPS 观测位移的高值区出现在青藏高原东南缘及川滇地区, 在喜马拉雅东构造结附近有明显的顺时针旋转; 此外, 青藏高原受印度洋板块的挤压碰撞向北东方向移动, 但在高原的东缘这种运动被四川地台抵阻, 将其运动分解成三个部分: 其一继续向北东方向移动, 但其速度明显减弱; 其二转向东南方向; 其三在地壳表层滑向四川盆地, 但速度分量很小。

1.2 地应变率场

为了得到龙门山断裂带及附近地区的地应变

率, 文中采用朱守彪等 (2005, 2006) [3-4] 提出的两次插值方法: 先将 GPS 观测速度在空间上进行 Kriging 插值得到均匀网格节点上的速度值, 然后利用拉格朗日插值 (类似于有限元中的形函数) 获得网格单元内的应变率结果。

图 2 是利用 GPS 观测资料计算的青藏高原东部地区主应变大小及方位分布图。由图可见, 主应变的高值区主要分布在鲜水河断裂带及附近, 主应变的方位与构造应力场的方向基本一致。同时, 从图 2 也可以看到在四川盆地及汶川地震震中附近应变水平很低。

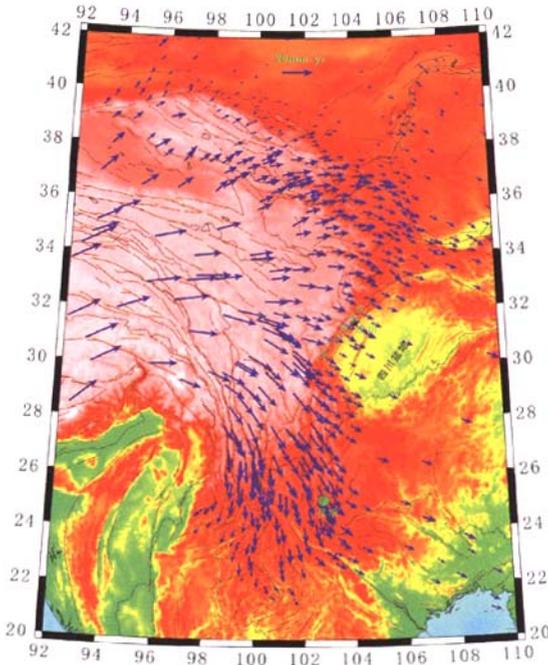


图 1 青藏高原东缘及邻区在 1999~2007 年间的 GPS 观测的速度分布 (相对于欧亚板块)

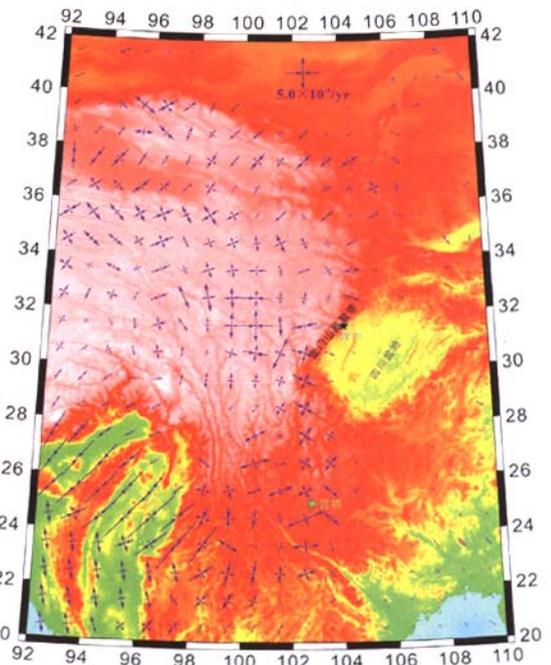


图 2 利用 GPS 观测资料计算的青藏高原东缘及周边地区的主应变大小及方位 (1999~2007) 分布图

注: 箭头向里表示主压应变, 箭头向外表示主张应变。

果表明, 在龙门山断裂带及附近, 由 GPS 资料计算的应变是比较小的, 可能与该地区介质强度较大<sup>[1]</sup>、断层闭锁紧密有关。

图 3 进一步给出由 GPS 观测资料计算的最大剪应变率的分布。最大剪应变率的等值线分布图能将南北地震带及鲜水河断裂带的轮廓显示出来, 且最大剪应变的高值也是沿着鲜水河断裂带分布, 最大值可达  $6 \times 10^{-8}/\text{yr}$ 。图中显示, 在龙门山断裂带及其附近最大剪应变率值也是很小的。图 2 及图 3 的结

果表明, 在龙门山断裂带及附近, 由 GPS 资料计算的应变是比较小的, 可能与该地区介质强度较大<sup>[1]</sup>、断层闭锁紧密有关。

图 4 为面应变 (也称面膨胀) 等值线分布图。由图可见, 汶川地震震中附近, 面应变呈现负值, 其量值为  $-(2\sim 4) \times 10^{-8}/\text{yr}$ ; 这说明汶川震中附近地区

处于挤压的应力状态下，龙门山还在继续升高；这与程万正和杨永林（2002）<sup>[4]</sup>给出的龙门山断裂带短水准测量结果有一致性。但在龙门山的北西西方向面应变为正，说明该地区处于拉张状态，地形可

能会出现沉降，即龙门山的西北面局部地区可能会发生沉降。当然，GPS 的观测是 10 年尺度的，在整个地质时期的表现，还要有其他地质调查资料加以印证。

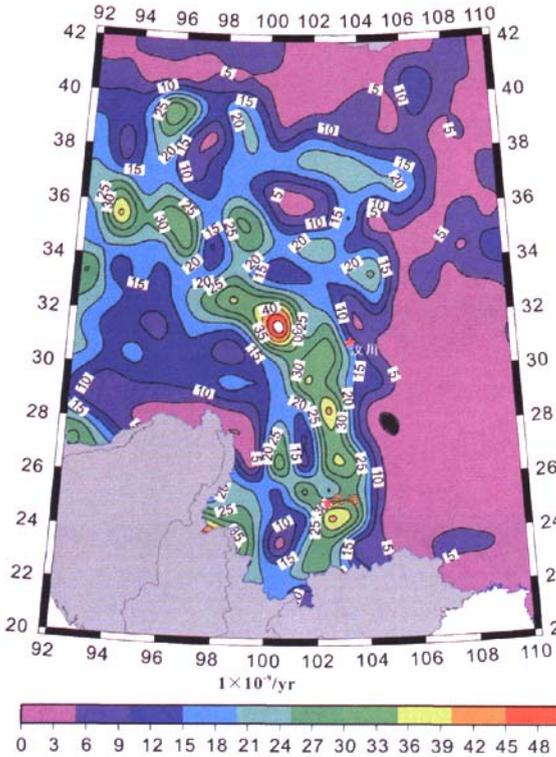


图 3 青藏高原东缘（含龙门山断裂带及周边地区）的最大剪应变率（1999~2007）等值线分布图

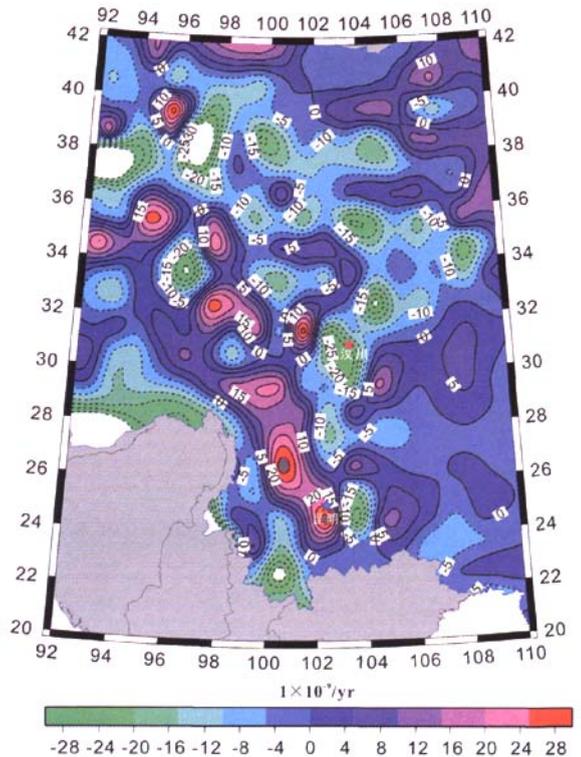


图 4 青藏高原东缘（含龙门山断裂带及周边地区）的面应变等值线分布图

## 2 汶川大地震的孕震机理分析

印度洋板块与欧亚板块的挤压碰撞，形成了青藏高原<sup>[5-9]</sup>；随着高原不断隆升，地壳加厚，其内部温度也逐渐升高，结果导致高原内部物质由弹性向流变性质转变。在推挤压力与重力的作用下，高原物质向四周运移，但由于高原被刚性强的块体所围限，因此出现了高原物质东流现象<sup>[10-18]</sup>；图 5 给出了青藏高原下地壳软物质运移的主要路线<sup>[15]</sup>。由图可见，东流物质在向东运移的过程中，在其东部由于受到强硬的四川盆地的阻挡，主要分成两个部分，其中一部分向东北方向移动，另一部分向东南方向流动。运动的速度是东南方向的大于东北方向。实际上，还有一部分东流物质被四川盆地堵住，

在龙门山及附近地区聚积，从而形成了陡峭的山峰。随着印度洋板块不断地向北东方向的俯冲碰撞，除了一部分物质被高原吸收外，有一部分经青藏高原“处理”后，变成具有流变性质的东流物质，东流物质继续向东运动后主要围绕四川盆地“流动”<sup>[17]</sup>。经过漫长的地质时期演化，青藏高原内部的物质东流最后趋于稳态。在这一过程中，四川盆地西缘的龙门山及附近地区不仅其下物质在不断集聚，龙门山断裂带上的应力与能量也在不断地转化与累积之中；当应力水平超过断层上的摩擦极限后，断层失稳开始滑动，发生地震。

此外，具有流变性质的下地壳向东移动的同时，上地壳在下地壳的拖动下<sup>[14,18]</sup>或在边界力作用下也向东运动（从近年 GPS 观测结果得到证实<sup>[19]</sup>），

甚至更陡)<sup>[1]</sup> 型形的龙门山逆冲断裂带的上部(约 20 km 以上)断层面上的正应力愈来愈大,使得断层的闭锁程度越来越高,因此龙门山断裂带的滑动速率就很小<sup>[1,20]</sup>,所以在龙门山断裂带及周边地区地震的活动水平也就很低。因而龙门山断裂带就被

认为是现今不活动的构造带。再者,龙门山地区宝兴杂岩及彭灌变质杂岩体的分布<sup>[20,21]</sup>,预示着龙门山断裂带是由强度很大的介质构成,这为龙门山断裂带能够积累高密度弹性应变能提供了物质基础。

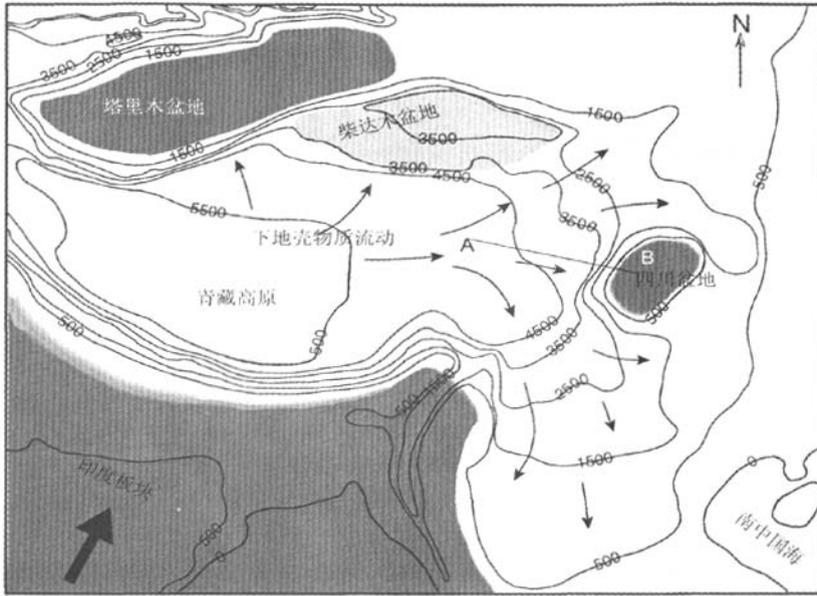


图 5 青藏高原高程等值线及下地壳物质运移图<sup>[15]</sup> (有修改)

注: 其中灰黑色表示冷的坚硬块体, 白色区域代表具有柔软的地壳地区, 这样柔软的下地壳就从高原中心向外逃逸, 图中箭头表示逃逸运动的方向; 粗黑色直线 AB 表示本文的研究剖面与地表的交线。

然而, 随着龙门山下部东流物质的不断积聚, 一方面使得龙门山继续隆升, 另一方面囤积物质对龙门山上盘的推挤作用加强, 导致断层面上的剪应力在不断增大, 当这种剪切力大到超过了摩擦强度时, 断层出现解锁产生突然滑动, 形成地震。由于断层闭锁程度高, 所以断层一旦滑动就会释放出巨大能量, 产生强烈地震。图 6 是地震孕育、发生的模型示意图。图中的 AB 大致是图 5 中 AB 的位置,  $V_1$  是上部地壳的速度,  $V_2$  是下部地壳的速度, 具有流变性质的下地壳速度大于上地壳速度<sup>[13]</sup>。高原由西向东的运动被四川盆地阻挡后, 部分物质和能量也就集聚在龙门山断裂带地区。

### 3 地震过程的有限单元法模拟

#### 3.1 有限单元模型

以图 5 中 AB 剖面为基准, 参考图 6, 研究中所采用的实际有限元模型几何及网格划分见图 7。为节约计算时间, 抓住问题本质, 模型长度比图 5 中 AB 线要短, 取 450 km; 模型的深度为 120 km。考虑到模型在施加重力后有上千米的缩短量, 所以 A 点下方 MOHO 面的深度取 70 km, 然后由西向东逐渐变浅。MOHO 与地表的中线为上、下地壳的分界线, 龙门山断裂带的位置及几何的参考文献<sup>[1,16]</sup>的结果。模型划分出的三角形单元数为 1 839, 节点数为 1 083 个。除了龙门山断裂带利用接触单元模拟外, 上、下地壳及下地壳与 MOHO 面之间也采用接触方法来模拟相互之间的运动。

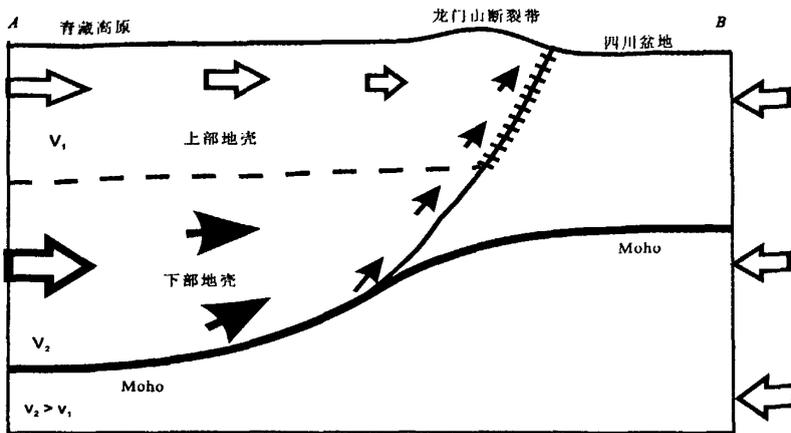


图 6 汶川地震孕育、发生的模型示意图

注：青藏高原 MOHO 面的深度为 60 km~70 km，四川盆地 MOHO 面的深度仅为 40 km（未按比例尺绘制）；图中  $V_2$  是下部地壳的速度， $V_1$  是上部地壳的速度，具有流变性质的下地壳速度大于上地壳速度；上地壳的东向运动使得断层闭锁更加紧密，下地壳物质在龙门山的堆积使龙门山不断隆升；同时积累能量，促使断层滑动，产生地震。

根据青藏高原东缘及龙门山和四川盆地的速度结构以及重力资料得到的介质密度分布来选择模型中介质的物性参数，上地壳视为弹性，其介质的杨氏模量取  $7.0 \times 10^4$  Mpa，密度为  $2.7 \text{ kg/m}^3$ 。下地壳视为 Maxwell 体，杨氏模量取  $6.8 \times 10^4$  Mpa，密度为  $2.8 \text{ kg/m}^3$ ，黏度为  $5.0 \times 10^{17} \text{ pa}\cdot\text{s}^{[13]}$ ；上地幔也视为 Maxwell 体，其杨氏模量取  $7.8 \times 10^4$  Mpa，密度为  $3.3 \text{ kg/m}^3$ ，黏度为  $1.0 \times 10^{21} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。龙门山断裂带及周边地区由于分布着强度大的变质杂岩，所以该区域介质的杨氏模量取为  $7.6 \times 10^4 \text{ MPa}$ ，密度为  $3.1 \text{ kg/m}^3$ ；四川盆地下的地壳及地幔介质，其杨氏模量及密度比青藏高原同深度处的要高 20%。实际情况或许不是如此，这样做的目的是在模拟中让四川盆地的动力表现近似为刚体。所有地区介质的

泊松比都取为 0.25，重力加速度取  $9.8 \text{ m/s}^2$  [22]。有限元模型的边界条件是，按照目前 GPS 系统观察的图 5 中 A 处的地表运动速度（15~20 mm/yr）施加到有限元模型的左侧。需要说明的是 Royden 等 [13] 根据下地壳的黏度等推测下地壳运动速度比上地壳要快约 5 倍，但考虑到由西向东的运动由于四川盆地的阻隔，其一向南东方向，另一向北西方向，因此只有一小部分物质囤积在四川盆地以西地区，所以模型中只在模型边界的西侧（从 A 点至下到模型底）水平向给定均匀位移，模型东侧（即 B 点一侧）水平向固定，垂直向自由；模型底部水平向自由运动，垂直向固定；地表自由。断层面利用有限元方法中的接触单元实现，其上的摩擦本构关系可以根据需要选定。

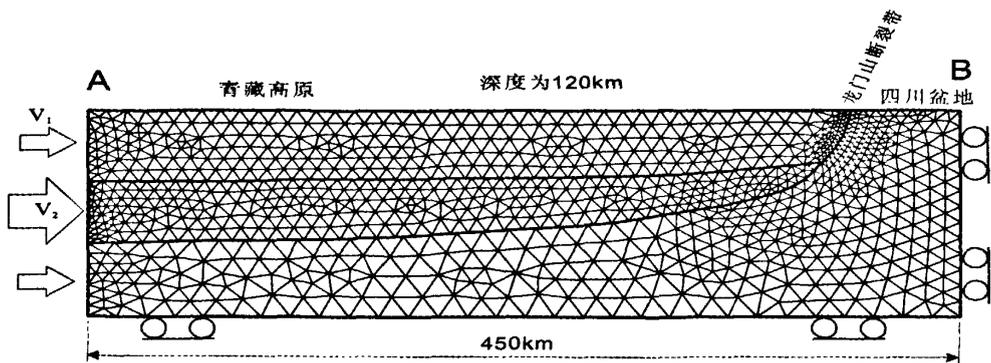


图 7 有限元模型几何及网格剖分图（模型长度取 450 km，深度为 120 km）

### 3.2 计算结果

图 8 给出了等效应力场 ( $\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}$ ) 在不同时间的变化图像。图 8(a~g)是按照时间递增的, 图中标注了具体的时刻。图 8a 中上地壳的等效应力明显低于下地壳及上地幔。但随着时间的推移, 上部地壳的应力水平在不断增高, 图 8c 中上部地壳的应力水平增大, 其量值与上地幔的应力水平相当, 两者都比下地壳的应力要高。图 8d 显示上部地壳的应力水平比下地壳及上地幔的应力明显增高, 尤其是龙门山断裂带的上部, 应力水平显著高于周围其他地区。图 8(e~g)龙门山断裂带及周围都保持着很高的应力水平, 尽管其间可能还有地震的

发生。

因此不难看出, 等效应力在空间的分布由分散状态逐渐向龙门山断裂带地区转移和集中。空间上, 龙门山断裂带成为了应力积累单元<sup>[23]</sup>, 应力水平不断升高, 直至超过摩擦极限, 产生地震。实际上, 随着龙门山的隆升, 该区域的应力水平一直在上升之中。其他应力分量如主应力、剪应力及变形能量密度等也有类似的时空演化特征。图 9 为变形能量密度的空间分布随时间的演化。由图可见, 应变能量密度也是从开始的分散状态, 不断地在空间演变, 最终在龙门山地区的中下地壳集聚, 为大地震的发生作准备。

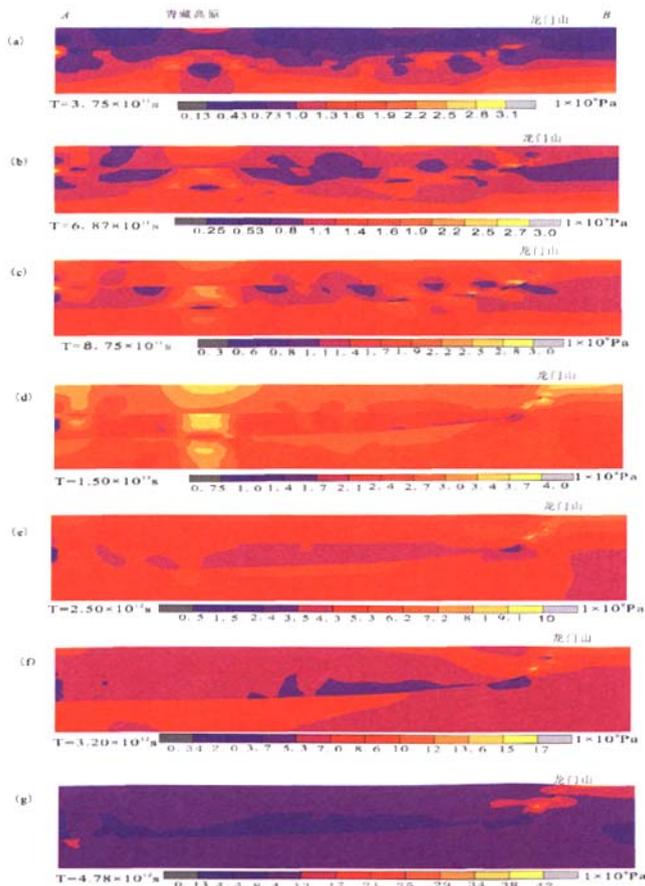


图 8 等效应力场在不同时间的分布图像<sup>[22]</sup>

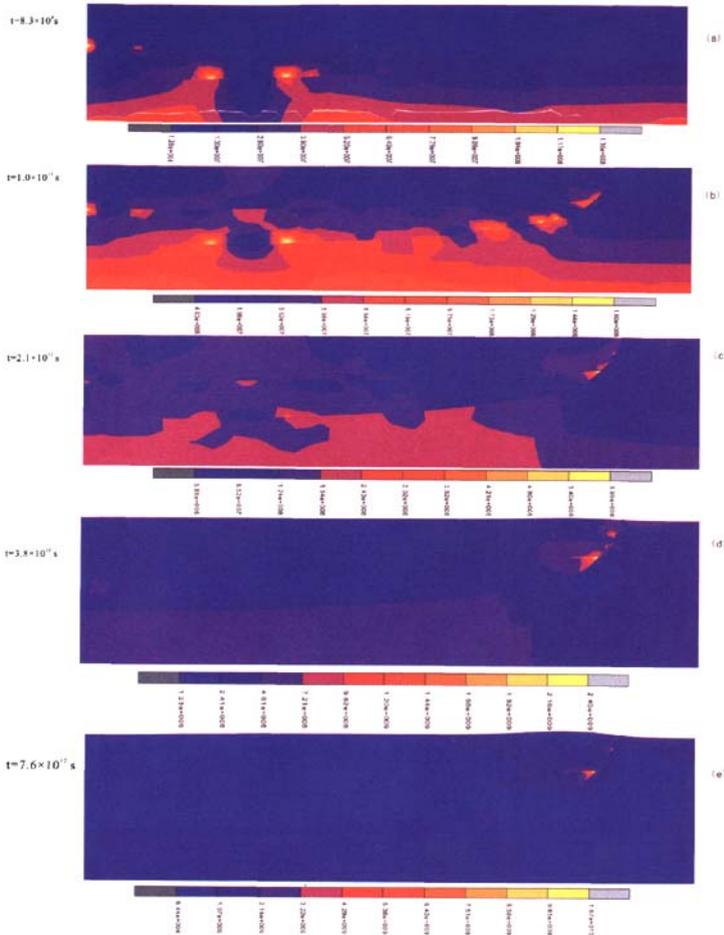


图 9 应变能量密度随时间的变化 (单位为  $J/m^3$ )

注: 由图(a)到图(e)时间逐次增大, 应变能密度在空间由分散分布逐步向龙门山地区聚集。

断层解锁产生突然滑动形成地震, 数值模拟中断层面上一次大的位移跃迁被认为是一次地震事件<sup>[24]</sup>。一般情况下, 位移跃迁(突然变化)周期会随着摩擦系数变化而变化, 通常是摩擦系数越大, 断层闭锁得越好, 积累的能量越高, 地震发生周期也会越长; 反之, 摩擦系数小, 地震的复发周期就短。图 10 为当摩擦系数取为 0.6 时模拟给出的龙门山断裂带上盘上的一个典型点(距离地表约 13 km)的位移随时间的变化曲线(为清晰, 仅取某一段时间)。地震之间的最大时间间隔为 5 006 年, 最小的为 1 184 年, 平均值为 3163 年。该结果与张培震等<sup>[1]</sup>通过地质资料给出的地震复发周期 2 000~6 000 年有一致性。此外, 从图 10 中位移台阶的量值高

也可看出同震位移大, 说明地震震级很高。

#### 4 关于地震预报的思考

从本文利用 GPS 资料计算的应变结果看, 龙门山断裂带及附近地区在汶川大地震之前, 其应变的数值要明显低于活动性强的构造带(如: 鲜水河断裂带)。因此, 我们从地表的观测结果来看, 龙门山断裂带是不活动的构造带, 该地区很难孕育、产生破坏性强震, 更不可能产生像汶川  $M_s8.0$  这样的特大破坏性地震。因此, 运用我们目前进行地震预报的常规方法, 不用说对汶川地震的短临预报或中期预报很难, 就连地震的蛛丝马迹都无法捕捉, 甚至会得出该地区近期和未来一段时间根本不会发

生地震的结论。我们仅仅利用 GPS 位移（速度）或计算的应变（率）来预测地震活动性，甚至进行实际的地震预报的思想也是不全面的。实际上，利用从地表获得的各种表象（如地形变、地下流体、地温等其他地球物理观测的各种曲线）数据或推测出来的结果来预测地震的做法也是目前的无奈之举，但其本质缺乏科学基础。由此可见，我们应该加强地震科学乃至整个地球科学的基础性研究工作，充分利用从地表得到的地震活动、地质构造、地表变形、重力异常、地表温度、地热、地磁、地电、地

下流体、壳幔各种物理结构等资料，在充分掌握“地情”的基础之上，再利用现代力学、数学、计算科学的理论、方法及技术通过科学计算，获得不同区域、不同深度的构造应力场的空间分布及其随时间的演化来预测、预报地震，才能增强地震预测的科学性、准确性。同时，文中的数值模拟结果也显示只要各种边界条件及介质的物性参数确定后，现代计算技术完全能够实现地震时、空、强的准确预测（像目前的天气预报一样）。

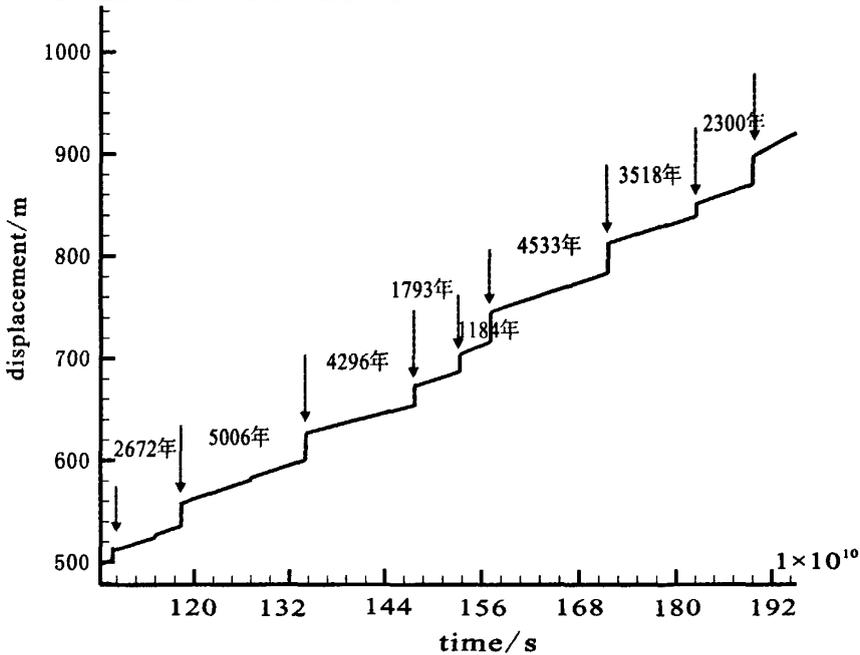


图 10 断层上盘上的典型点的位移随时间的变化曲线

注：位移的突变（即图中的台阶）视为一次地震事件，图中显示地震平均的复发周期约为 3163 年。

由以上分析可见，加密各种观测台站（地震台站及地球物理观测）的布设，提高台站监测人员的业务水平及职业道德，保证观测数据的质量及数据的全面实时共享，加强基础科学研究，进而进行数值地震预报才是地震预报科学发展的必由之路。汶川地震的发生再一次教育我们那种急功近利，为地震预报而专门预报的思想是不切实际的；我们要尽快地、有步骤的放弃仅凭观测曲线或其统计结果来进行地震预报的通用做法；我们必须老老实实，遵从科学发展的规律，将观测和科研并重，最终才能彻底解决地震预报问题，才能有效的减轻地震灾害的损失，为人类作出应有的贡献。

### 结束语

通过数值计算及分析，得出如下初步认识：

2008 年汶川地震是多种地质因素综合作用的结果。发生的主要原因是稳定的四川盆地对青藏高原物质东流运动的阻挡，导致物质和能量在川西地区囤积。此外，由于高角度、犁形的龙门山断裂带的特殊构造，上部断层的正应力随着川西高原向东运动而不断增大，导致该断层的闭锁性加强；同时随着高原东流物质的不断向东运动，龙门山下部囤积的物质对断层上盘不断推挤，造成龙门山断裂带上的剪应力越来越大；当剪应力超过摩擦强度时，断层解锁产生滑动，发生地震。此外，分布在断层附近的变质杂岩为存贮高密度弹性应变能提供物

质保障。另外, 龙门山断层面上的摩擦系数较大, 龙门山断裂带上大地震的平均复发周期约为 3 163 年。川西地区向东运动使得龙门山断层闭锁性加强造成了汶川地震前震中及附近地区变形场等其他地震前兆场特征不明显。因此, 只有加强各种观测手段的力度, 提高观测数据的质量及共享的程度, 通过科学计算进行数值地震预测才是发展地震预报科学的必由之路。

#### 参考文献

- [1] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1066-1073.
- [2] 朱守彪, 蔡永恩, 石耀霖. 青藏高原现今构造应变率场的计算及其结果的地球动力学意义[J]. 地球物理学报, 2005, 22(3): 292-302.
- [3] Zhu Shoubiao, Yongen Cai, Yaolin Shi. The contemporary tectonic strain rate field of continental China predicted from GPS measurements and its geodynamics implications[J]. Pure Appl. Geophys. 2006, 163: 1477-1493.
- [4] 程万正, 杨永林. 川滇地块边界构造带形变速率变化与成组强震[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 2(4): 21-24.
- [5] England P C, Houseman GA. Finite Strain Calculations of Continental Deformation, 2, Comparison with the India-Asia Collision[J]. J. Geophys. Res., 1986, 91: 3664-3676.
- [6] Molnar P, Tapponnier. Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision[J]. Science, 1975, (189): 419-426.
- [7] England P C, Houseman GA. The Mechanics of the Tibetan Plateau[J]. Phil Trans R Soc Lond, 1988, A326: 3012320.
- [8] Parrison TM, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet[J]. Science, 1992, 255: 166-321670.
- [9] Peter Bird. Later extrusion of lower crust from under high topography, in the isostatic limit[J]. J. Geophys. Res. 1991, 96: 10275-10286.
- [10] 曾融生, 孙为国. 青藏高原岩石圈及其东部邻区的地震活动性和震源机制以及高原物质东流的讨论[J]. 地震学报, 1992, 14(增刊): 523-533.
- [11] Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet[J]. Science, 1997, 276, 2: 788-790.
- [12] 熊熊, 许厚泽, 滕吉文. 青藏高原物质东流的岩石力学背景探讨[J]. 地壳形变与地震, 2001, 21(2): 1-6.
- [13] Royden L H, Burchfiel B C, Robert D van der Hilst. The Geological Evolution of the Tibetan Plateau[J]. Science, 2008, (321): 1054-1058.
- [14] 朱守彪, 石耀霖. 青藏高原地形扩展力及下地壳对上地壳拖曳力的遗传有限单元法反演[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(2): 225-234.
- [15] Clark M, L H Royden. Topographic ooze: building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. Geology, 2000, 28(8): 703-706.
- [16] Burchfiel B C, Royden L H, vander Hilst R D, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China[J]. GSA Today, 2008, 18(7), doi: 10.1130/GSATG18A.1.
- [17] Enkelmann E, L Ratschbacher, R Jonckheere, et al. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling: Is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan Basin? GSA Bulletin, 2006, 118(5/6): 651-671, doi: 10.1130/B25805.1.
- [18] 朱守彪, 石耀霖. 中国大陆及邻区构造应力场成因的研究[J]. 中国科学(D 辑), 2006, 36(12): 1077-1083.
- [19] Gan W, Zhang P, Shen Z, et al. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[J]. J. Geophys. Res., 2007, 112, B08416, doi: 10.1029/2005JB004120.
- [20] 张培震. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(9): 1041-1056.
- [21] 许志琴, 李化启, 侯立玮. 青藏高原东缘龙门山-锦屏造山带的崛起—大型拆离断层和挤出机制[J]. 地质通报, 2007, 26(10): 1262-1276.
- [22] 朱守彪, 张培震. 2008 年汶川 M<sub>s</sub>8.0 地震发生过程的动力学机制研究. 地球物理学报, 2009, 52(2): 418-427.
- [23] 郭增建, 秦保燕. 震源物理[M]. 北京: 地震出版社, 1979.
- [24] 朱守彪, 邢会林, 谢富仁等. 地震发生过程的有限单元法模拟—以苏门答腊俯冲带上的大地震为例[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 460-468.

## A Study on Preparation Mechanis $M_S$ of Wenchuan Earthquake and Its Implication to Earthquake Prediction

Zhu Shoubiao

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085)

**Abstract:** The sudden and unexpected Wenchuan earthquake occurred on the Longmenshan Fault, which is not active recently. It exerts an important influence on the society and scientific community. The author tries to study the preparation mechanisms of the Wenchuan earthquake from two different aspect: one is studying the strain rates on the earth surface, the other is modeling the earthquake process by finite element method. Firstly, Using GPS vectors, the strain rate field is obtained by means of two interpolation method proposed by Zhu. The results suggest that the orientations of the principal strain rates agree with those of the tectonic stresses in Longmenshan Fault and adjacent areas. However, the deformation in and near the Longmenshan Fault is small, suggesting that the Longmenshan Fault is locked. Then, the simulation result shows that the stresses and strain energy densities are transferred to and concentrated in the Longmenshan area from a state of decentralization in space. And the average recurrence time of earthquakes in the Longmenshan area is about 3 163 years, which is in agreement with the result by other methods.

Based upon the results from previous studies and the present paper, the dynamical process of the Wenchuan earthquake is assumed as: with the movement of eastward mass flow of the Qinghai-Tibet Plateau, some part of material would accumulate on the west brim of the Sichuan Basin since the stable and strong Sichuan Basin blocks the eastward flow, resulting in the rise of the Longmenshan Mountains. The value of the normal stresses on the fault plane which is steep (the dip angle of  $50^\circ \sim 70^\circ$ ) and of listric shape, increases with the eastward motion of the plateau of the western Sichuan, making the fault plane lock tighter. At the same time, the accumulated material will exert stronger and stronger forces to the hanging wall of the Longmenshan Fault; therefore the shear stresses on the fault are becoming greater and greater with the movement of eastern mass flow of the pleatau. Once the shear stresses exceed the friction strength, the fault will be unlocked, and it will slip suddenly. Hence an earthquake occurs. Lastly, some of the questions on earthquake prediction are put forward according to the new type of strong events such as the Wenchuan earthquake.

**Key words:** Wenchuan earthquake; GPS measurement; finite element; earthquake prediction