

陈祖安, 林邦慧, 白武明等. 2008 年汶川 8.0 级地震孕震机理研究. 地球物理学报, 2009, 52(2): 408~417

Chen Z A, Lin B H, Bai W M, et al. The mechanism of generation of May 12, 2008  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(2): 408~417

## 2008 年汶川 8.0 级地震孕震机理研究

陈祖安<sup>1,3</sup>, 林邦慧<sup>2</sup>, 白武明<sup>1</sup>, 程 旭<sup>1</sup>, 王运生<sup>3</sup>

1 中国科学院地质与地球物理研究所地球深部研究重点实验室, 北京 100029

2 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

3 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059

**摘 要** 用三维流变非连续变形与有限元相结合(DDA+FEM)的方法, 在青藏高原及邻近地区三维构造块体相互制约的大背景中, 考虑了龙门山断裂带东西两侧地势、地壳厚度和分层的明显变化, 及断裂带东侧四川盆地及鄂尔多斯块体坚硬地壳阻挡的影响, 通过用 GPS 资料做位移速率边界约束和震源机制约束, 计算得到研究区的速度场和应力场与该地区 GPS 测量结果和震源机制分布结果基本一致. 在此基础上, 模拟计算现今构造块体边界断层面上表征剪应力及法向应力等综合影响的危险度分布. 结果表明, 上、中地壳层危险度分布中危险度较高的地段多数与近几十年来发生的七级以上大震区域基本一致. 包括 2008 年汶川 8.0 级等大震的发震断层. 通过分别对龙门山断裂带东西两侧的两种不同构造格局进行试算表明, 龙门山断裂带东西两侧地势、地壳厚度、分层与物性明显变化对汶川大震的孕育发生均起了关键性作用. 计算得到的应变率强度分布图可见, 高原东部整个边缘地带均接近应变率强度的陡变带. 其中以龙门山断裂带上的陡变最为明显, 西侧应变率强度是东侧的近 4 倍, 而且断裂带东侧应变率强度等值线衰减比西侧快. 反映了汶川大震逆冲型发震断层地区独特的特征. 此外, 由计算得到的应变能密度分布图可见, 龙门山断裂带在上、中地壳层中均位于宽度相同、其走向与龙门山断裂带走向一致的高应变能密度带中, 在上地壳层这个带的东西两侧则是应变能密度较低的地区, 而在中地壳层, 其强度在断裂带东侧逐渐向东衰减, 西侧应变能密度高, 而东侧应变能密度较低. 表明在印度板块强烈推挤作用和高原各构造块体相互制约及龙门山断裂带东西两侧特殊构造环境中, 高原地壳物质向东水平运动, 受到龙门山断裂带东侧介质刚性强度较大的四川盆地阻挡, 使得汶川大震发震断层在大震前已积累了相当水平的应变能, 并同时处于力学上的不稳定状态.

**关键词** 汶川地震, 孕震机理, 青藏高原, 龙门山断裂带, 非连续变形分析方法

文章编号 0001-5733(2009)02-0408-10

中图分类号 P315

收稿日期 2009-01-04, 2009-01-22 收修定稿

### The mechanism of generation of May 12, 2008 $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake

CHEN Zu-An<sup>1,3</sup>, LIN Bang-Hui<sup>2</sup>, BAI Wu-Ming<sup>1</sup>, Cheng Xu<sup>1</sup>, WANG Yun-Sheng<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of the Study of Earth's Deep Interior, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Institute of Geophysics, Chinese Seismological Bureau, Beijing 100081, China

3 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract** In this paper, 3-D Finite Element Method combined with Discontinuous Deformation Analysis (DDA + FEM) is used with the constraints of 3-D tectonic blocks of Qinghai-Xizang Plateau and neighboring areas to study the pregnant mechanism of Wenchuan earthquake. The topography on both sides of Longmenshan fracture zone, the marked change in thickness of the crust and its layers, and the influence of a stronger crust in the Sichuan Basin and Ordos block on

the eastern side of the fracture zone are taken into consideration. With the GPS data constrained on the boundary, the calculated velocity and stress fields agree with the observed GPS data and the focal mechanism distribution results. On this basis, the distribution of risk factors on the boundary faults of tectonic blocks, which characterize overall influences of shear stress and normal stress on fault face, etc, is calculated numerically. The results show that the sections with high risk factors coincide with the areas where most of the  $M_s > 7$  earthquakes have occurred in recent decades, including  $M_s = 8.0$  Wenchuan earthquake in 2008. Trial computation of situations of two different structures on both east and west side of Longmenshan fracture zone show that significant changes of the topography on both sides, the thickness and the layers of the crust, and the physical properties played important roles in the pregnant mechanism of the Wenchuan earthquake. The calculated distribution maps of strain intensity show that the eastern edges of Qinghai-Xizang Plateau are close to the strain intensity steep change zone. Of the zones with steep change in strain intensity in eastern edge of the plateau, Longmenshan fracture zone shows the steepest change. The intensity contour on the east side of the fracture zone decay faster than the west side. In addition, the calculated strain energy density contour shows that the width and the strike direction of the upper and middle layers of the Longmenshan fracture zone is located in the same direction of the high strain energy density band. In the upper layer of the crust, low strain energy density is found on both sides. In the middle layer of the crust, the strain energy density decreases from west to east; the western side has high strain energy density, the eastern side has low strain energy density. Our results show that under strong subduction of Indian Plate, constraints of 3-D tectonic blocks in Qinghai-Xizang Plateau and influence of special tectonic environment on the west and east side of the Longmenshan fracture zone, the seismic fault area, where Wenchuan earthquake occurred, had accumulated sufficient strain energy. It indicates that the area is in mechanical instable state.

**Keywords** Wenchuan earthquake, Mechanism of generation, Qinghai-Xizang Plateau, Longmenshan fault zone, DDA

## 1 引言

2008 年 5 月 12 日在青藏高原东缘的龙门山断裂带上发生了 8.0 级强烈破坏性大震. 这是继 2001 年昆仑山 8.1 级大震发生 7 年之后, 青藏高原昆仑块体边界断裂上再次发生的 8 级大震, 也是世界内陆地区罕见的逆冲型强烈地震, 引起了世界特别是地震学界的极大关注. 研究者从不同角度对地震进行研究, 并对其孕育发生机理进行解释, 取得了重要进展<sup>[1~8]</sup>. 前人的多项研究表明青藏高原地区的大震活动是该区在几大板块作用特别是印度板块强烈俯冲及青藏高原特殊构造的大背景中的流变动力学过程所致<sup>[9~13]</sup>. 本文将尝试从这个角度探讨汶川大地震的孕育发生机理.

自 1976 年唐山 7.8 级地震发生后, 我国大陆地区经历了 12 年七级大震平静, 1988 年进入七级

以上大震活跃期, 发生了 10 次七级以上大震, 并均发生在青藏川滇地区构造块体的边界断层上. 特别从 1996 年至今, 在昆仑块体及羌塘块体这两个相邻块体周边边界断层上共发生 2 次八级地震, 4 次七级以上地震及 1 次接近七级的地震, 见图 1, 大震活动相当频繁. 表明在青藏高原受到印度板块强烈俯冲及其东缘受到东侧四川盆地及鄂尔多斯块体坚硬地壳的阻挡, 高原物质由北北东转向东, 再转向南东的“差速”水平运动推挤的背景下, 青藏川滇块体系统中块体边界断层的多个部位的应变能已积累到相当的水平, 并达到或接近破裂强度, 同时也似乎表明, 青藏川滇构造块体系统中块体运动变形的相互影响与大震活动有一定关系. 然而这仅是定性认识, 需要从力学角度进行深入研究.

考虑到印度板块向北挤压造成青藏高原的隆起并产生巨厚的地壳(约 70 km), 由于地壳内温度上升, 使下地壳层速度低且高导层发育, 介质成较强黏

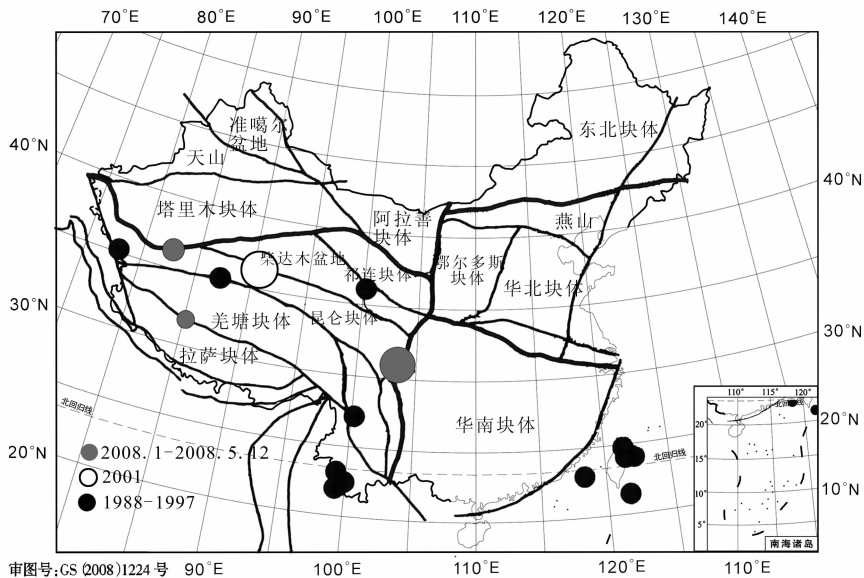


图 1 1988 年以来我国大陆地区 6.9 级以上大震及构造块体分布图

Fig. 1 Distribution map of larger than  $M_s 6.9$  earthquakes since 1988 and tectonic blocks

塑性. 在印度板块向北推挤下, 下地壳的黏塑性流动驱动着上地壳脆性层运动与变形, 形成了这个地区复杂的孕震环境, 需要采用三维流变模型进行研究.

非连续变形分析方法是一个分析块体系统中块体相互作用的有效工具<sup>[14]</sup>. 它可以计算块体系统在动力及静力作用下块体的滑移及不连续变形. 对于各个块体允许有滑移、压性或剪切变形, 对于整个块体系统, 允许块体边界断层有滑动. 至今, 已有一些学者用这个方法进行多项研究, 并取得重要成果<sup>[12, 15~17]</sup>. 这个方法适合用来模拟大震的破裂过程和大震活动与构造块体的相互作用的关系.

本文用三维流变非连续变形与连续变形分析相结合的方法<sup>[13]</sup>, 在几大板块作用特别是印度板块强烈俯冲的背景和青藏川滇地区各构造块体相互制约的大环境中, 通过用 GPS 资料作位移边界约束及震源机制分布约束, 数值模拟各构造块体边界断层上的危险度分布和研究区的应变率强度分布及应变能密度分布; 研究汶川大震孕震发生机理, 并为青藏川滇地区的地震危险性提供参考依据.

## 2 块体系统计算模型及速度场和应力场模拟

本文取青藏高原及其东侧的四川盆地和鄂尔多斯地区作为研究区, 见图 2a. 地表面构造块体划分参考张培震等<sup>[18]</sup>对我国大陆地区构造块体划分结果, 将研究区划分为: 塔里木、柴达木、阿拉善、祁连、

昆仑、羌塘、拉萨、川滇、滇西南、鄂尔多斯、四川盆地及华南等十二个块体. 块体边界断层包括, 阿尔金断裂带, 祁连山断裂带、西秦岭断裂带, 东昆仑断裂带、西昆仑断裂带、六盘山断裂带、贺兰山断裂带、玛尼—玉树带、喀喇昆仑断裂带, 喜马拉雅断裂带、龙门山断裂带、鲜水河断裂带、三江断裂带、红河断裂带、安宁河—小江断裂带、澜沧江断裂带、秦岭大别山断裂带、汾渭断裂带和阴山断裂带等近二十条断裂带.

将上述区域垂直深度 120 km 的空间划分为 5 层, 在青藏高原东缘以西地区划分上地壳层 20 km, 中地壳层 20 km, 下地壳层 30 km 及上地幔. 由于资料限制, 为简化起见, 除龙门山断裂带以外, 其他边界断层均考虑为直立. 在青藏高原东缘及以东地区, 考虑了龙门山断裂带东西两侧地势及地壳厚度和分层的明显变化<sup>[1, 2, 4, 5, 11]</sup>. 地势从四川盆地海拔 500 m 向西到龙门山地区陡升至 4000 m. 地壳厚度在四川盆地为 45 km 向西逐渐增厚, 在龙门山断裂带东侧地区为 60 km, 并逐渐向西增厚. 其西侧的青藏高原地区地壳厚度为 70 km. 在龙门山断裂带地区上地壳层及中地壳层各为 15 km, 下地壳层为 30 km. 龙门山断裂带的倾角在中地壳层中为  $40^\circ$ , 在上地壳层中为  $60^\circ$ , 如图 2b 所示. 汶川大震初始破裂点位于中地壳层中. 为了提高块体内应力应变计算的精度, 在每个块体内划分一些有限元网格. 有限单元为六面体. 整个块体系统共划分有 4236 个结点, 3205 个单元. 底面垂直方向约束, 水平方向可移动. 在块

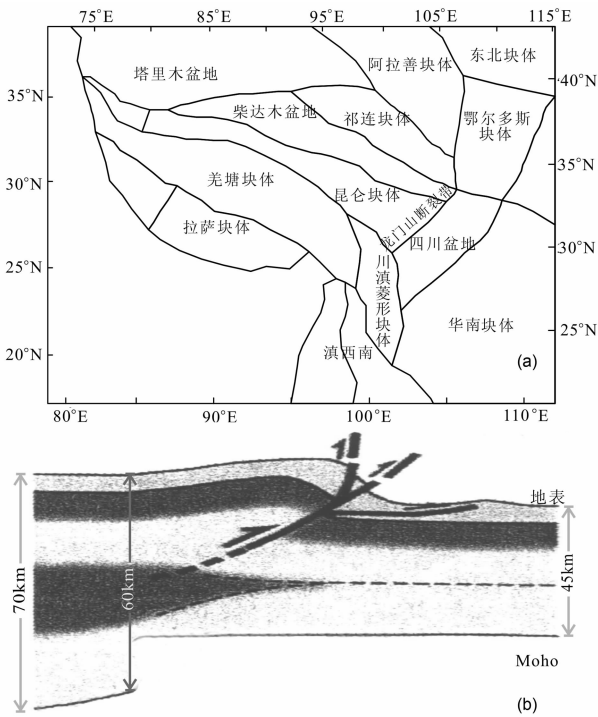


图 2 (a)构造块体模型图;(b)龙门山断裂带地区地壳分层垂直剖面分布示意图

Fig. 2 (a) Sketch of tectonic block model; (b) Sketch of vertical layered section at Longmenshan fracture zone

体内计算速度场时采用流变本构关系,类似于作者以前的工作<sup>[13]</sup>.由此计算的应力场由边界速度确定,而重力作用按弹性半空间模型计算的静岩应力简化处理,当作初始应力加入模型计算的应力中去.

考虑到青藏川滇地区 P、S 波速度结构的不均匀,特别是参考滕吉文、刘启元、王椿镛、丁志峰和楼海等<sup>[19~24]</sup>对青藏高原地区地震波三维速度结构的研究结果.考虑到拉萨块体的上地壳和龙门山断裂带西侧松潘、甘孜一带中地壳层存在明显的低速区及羌塘块体和川滇菱形块体地区的下地壳层波速也相对较低,而龙门山断裂带东侧四川盆地的波速及密度较高.本文对不同块体各层采用不同的物性参数<sup>[25]</sup>,见表 1.其中拉萨块体上地壳层杨氏模量相对其他块体较小,而塔里木块体上地壳的杨氏模量相对较大,考虑到下地壳层处于温度较高的状态,速度低且高导层发育,介质呈较强的黏塑性,研究区整个下地壳层均考虑为软弱层,特别是羌塘及川滇两块体的下地壳层更软.对青藏高原东缘及以东地区,考虑了四川盆地及鄂尔多斯块体的地壳介质强度大,而龙门山断裂带西侧的松潘、甘孜一带地壳层的介质强度相对弱,特别是中下地壳层.在鄂尔多斯块体南

表 1 计算模型中材料力学参数

Table 1 The mechanical parameters of materials in the model

单元参数	地区	杨氏模量(MPa)	泊松比	密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏滞系数( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	接触刚度(MPa)
上地壳	拉萨块体	550000	0.35	2670	$1.70 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	昆仑块体东:甘孜—松潘	550000	0.35	2670	$1.70 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	塔里木块体	750000	0.35	2680	$2.30 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	鄂尔多斯	800000	0.35	2680	$2.52 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	四川盆地	800000	0.35	2680	$2.52 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	华南块体	700000	0.35	2670	$2.20 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	东北块体	700000	0.35	2670	$2.20 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	其他块体	650000	0.35	2700	$2.00 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
中地壳	昆仑块体东:甘孜—松潘	430000	0.30	2780	$1.35 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	四川盆地	930000	0.30	2800	$2.93 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	鄂尔多斯	850000	0.30	2800	$2.68 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	华南块体	800000	0.30	2790	$2.52 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	东北块体	800000	0.30	2790	$2.52 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	其他块体	797000	0.30	2790	$2.50 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
	下地壳	羌塘块体	450000	0.30	2920	$1.40 \times 10^{19}$
川滇块体		450000	0.30	2920	$1.40 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
昆仑块体东:甘孜—松潘		450000	0.35	2920	$1.40 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
四川盆地		650000	0.35	2940	$2.00 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
鄂尔多斯		650000	0.35	2940	$2.00 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
华南块体		600000	0.35	2930	$1.89 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
东北块体		600000	0.35	2930	$1.89 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
其他块体		530000	0.35	2930	$1.60 \times 10^{19}$	$1.0 \times 10^{10}$
岩石圈地幔		2120000	0.35	3300	$1.00 \times 10^{20}$	

侧与四川盆地北部之间存在一个介质强度较弱的地带。

为了研究青藏高原及邻区构造块体边界断层上的危险度及研究区的应变率强度和应变能密度的分布特征,我们要首先满足模拟计算的上地壳层速度场和应力场与青藏川滇地区 GPS 资料获得的速度场<sup>[26]</sup>及用地震资料获得的该区构造应力场<sup>[27]</sup>一致。本文采用位移边界条件,地表速度值参考张培震 GPS 资料得到的相应地区地表速度场(参考框架为稳定的欧亚板块)结果<sup>[26]</sup>,通过尝试,我们在一组边界条件下得到了如图 3a 所示的地表速度场和部分的模拟计算的震源机制分布图(图 3b)。模拟震源机制通过计算获得的主应力投影到乌尔夫网来表示。计算的地表速度场的大小从喜马拉雅断层带向北到阿尔金断裂带及祁连断裂带逐渐由大变小。速度方向从南边的喜马拉雅断裂带西南部的北北东方向随着向北推移逐渐向东偏转,在羌塘块体,昆仑块体及柴达木块体的东部位移方向接近向东的方向。并从龙门山断裂的西部向南到川滇块体位移方向逐渐再向南偏转,由南东方向逐渐转为南南东向。整个图像与由 GPS 资料获得的速度场的分布图像相似。计算的模拟震源机制图表明青藏高原周边为逆断层型震源机制,高原内部特别是喀喇昆仑断裂带上主要以拉张性质的正断层震源机制为主,但在东昆仑断裂及玛尼—玉树带上存在部分左旋走滑型的震源机制,与由地震波资料得到的震源机制解图及近年来发生大震的机制结果<sup>[27]</sup>很类似。这为下一步研究打下了基础。

### 3 研究区构造块体边界断层的危险度分布

在上述计算速度场及应力场与用 GPS 资料得到的相应地区速度场及用大量震源机制结果获得的构造应力场结果大致一致的基础上,进一步计算青藏川滇构造块体边界断层上的危险度分布。本文定义断层上的危险度因子  $G$  为:

$$G = \tau / (\sigma_n \operatorname{tg} \phi), \quad (1)$$

这里  $\sigma_n$  为断层面上的法向应力,  $\tau$  为断层面上的剪切应力,它们均为绝对值,  $\phi$  为摩擦角。剪应力越大,危险度越大;法向应力越大,危险度越小;摩擦角越大,危险度越小。危险度的大小取决于三者的综合效果。这里危险度的说法与 20 世纪 80 年代王仁等<sup>[28]</sup>在数学模拟华北地区近 700 年地震序列研究工作中

引入的安全度这一概念类似。

图 4a1 是模拟计算得到的青藏川滇地区构造块体边界断层上的危险度分布图。本文摩擦系数主要参考王闯昭等用 GPS 资料得到断裂活动速率的结果<sup>[29]</sup>。由图可知:计算得到上地壳层的构造块体边界断层的危险度较高、容易失稳的地段多数与近几十年来发生的七级大震区域基本一致。包括 1990 年共和 7.0 级大震,1996 年阿图什 7.0 级大震,1997 年玛尼 7.9 级大震,2001 年昆仑山 8.1 级大震及 2008 年汶川 6.9 级、玉田 7.3 级和汶川 8.0 级大震的发震断层。图中还显示阿尔金断裂带的东段和西段、鄂尔多斯块体的西南、喀喇昆仑断裂带东北段与西南段、鲜水河断裂带中段、祁连山断裂带的西北段和阴山断裂带的东段等地段危险度也较高。从图 4a2 还清楚显示龙门山断裂带的中、南段在中地壳层的危险度明显比上地壳层大,这与汶川大震初始破裂点( $H=19$  km)位于中地壳层的事实一致。

为了探讨龙门山断裂带东侧四川盆地坚硬地壳的阻挡作用对汶川地震孕震的影响,图 4b1 和图 4b2 分别给出龙门山断裂带地区地势、地壳厚度和分层分布不变情况下断裂带东侧各层的介质参数分别与西侧介质参数相同时的上、中地壳层危险度分布计算结果。由图可见,龙门山断裂带的中段(汶川地震发震断层)和南段在图 4a 中的红色段(最危险段)均降为黄色段(危险度较高),出现了较明显的变化。

为了探讨地势和地壳厚度及分层在龙门山断裂带东西两侧明显变化对汶川地震的孕震的影响,图 4c1 和图 4c2 分别给出地壳平行分层模型(上、中和下地壳层厚度各为 20、20 和 30 km)的上、中地壳层危险度分布计算结果。由图可见,在上地壳层龙门山断裂带的中段和南段在图 4a1 中的黄色段及红色段均相应降为危险度较低的蓝色段和黄色段,出现了比图 4b1 更为显著的变化。在中地壳层,断裂带的中段(汶川地震发震断层段)从原来的红黄两色段降为黄蓝两色段,南段的红色段仍不变。显示了在平行层地壳模型中龙门山断裂带西侧中地壳层中低速层的存在及东侧四川盆地坚硬地壳的阻挡对危险度分布也有明显的影响。由于在这个模型的上地壳层(0~20 km)中,龙门山断裂带中段危险度明显降低,而在中地壳层(20~40 km)中仍有危险,这种分布有可能导致汶川大震震源深度将从现在的 18 km 变得更深。说明龙门山断裂带东西两侧地势、地壳厚度、分层及物性的明显变化均是影响危险度变化的关键因素。

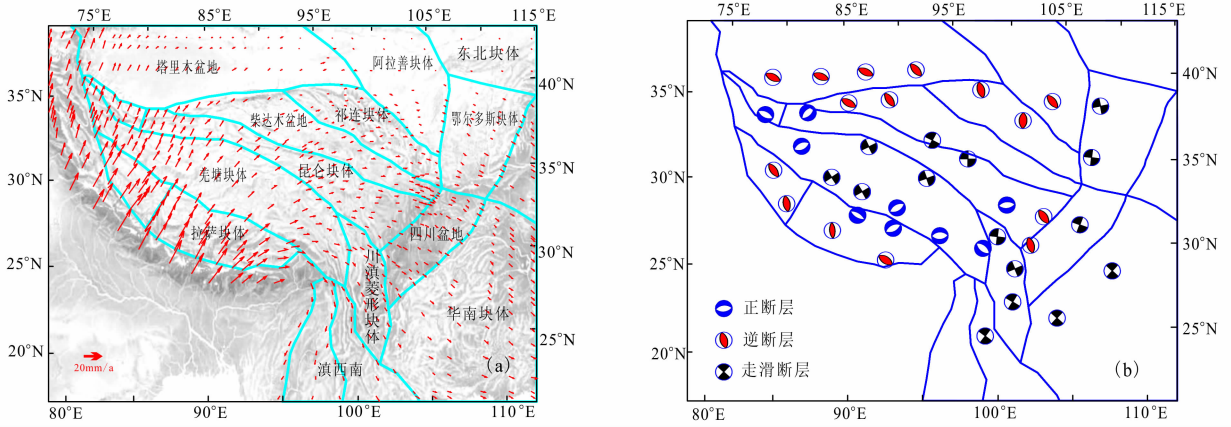


图 3 (a) 计算得到的地表速度场分布图;(b) 计算得到的上地壳层模拟震源机制分布图  
 Fig. 3 (a) Distribution of surficial velocity calculated in study zone; (b) Distribution of focal mechanism calculated from stresses tensor in upper crust

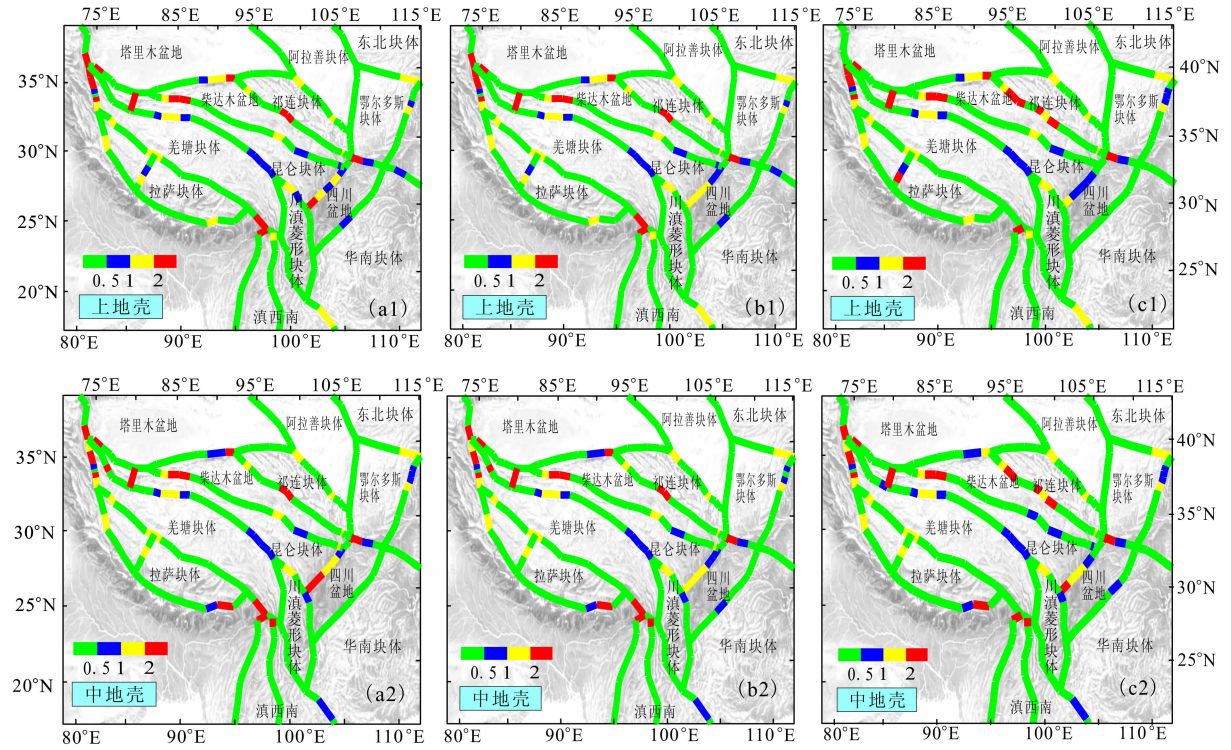


图 4 (a1, a2) 研究区构造块体边界断层上的危险度分布图;(b1, b2) 龙门山断裂带东侧介质参数与西侧相同时的危险度分布图;(c1, c2) 龙门山断裂带地区的地壳模型为平行分层模型的危险度分布图;(a1, b1, c1) 上地壳层, (a2, b2, c2) 中地壳层

Fig. 4 (a1, a2) Distribution of risk factor on boundary faults of tectonic blocks in study zone; (b1, b2) Distribution of risk factor under same parameters of medium on both side of east and west of Longmenshan fracture zone; (c1, c2) Distribution of risk factor under a model of horizontal layers of crust at Longmenshan fracture zone; (a1, b1, c1) Upper crust; (a2, b2, c2) Middle crust

#### 4 应变率强度和应变能密度的分布特征

本文将表征变形程度的应变率张量第二不变量称为应变率强度. 图 5a 和图 5c 分别是研究区在上地壳层

及中地壳层的应变率强度的分布图. 由图可以看出, 青藏高原绝大部分地区存在很强的剪切应变, 青藏高原东部边缘地带基本上接近应变率强度的陡变带, 其中以龙门山断裂带东西两侧应变率强度的陡变最为明显. 在上地壳层, 西侧为  $565.9 \times 10^{-18} / a$ , 东侧为

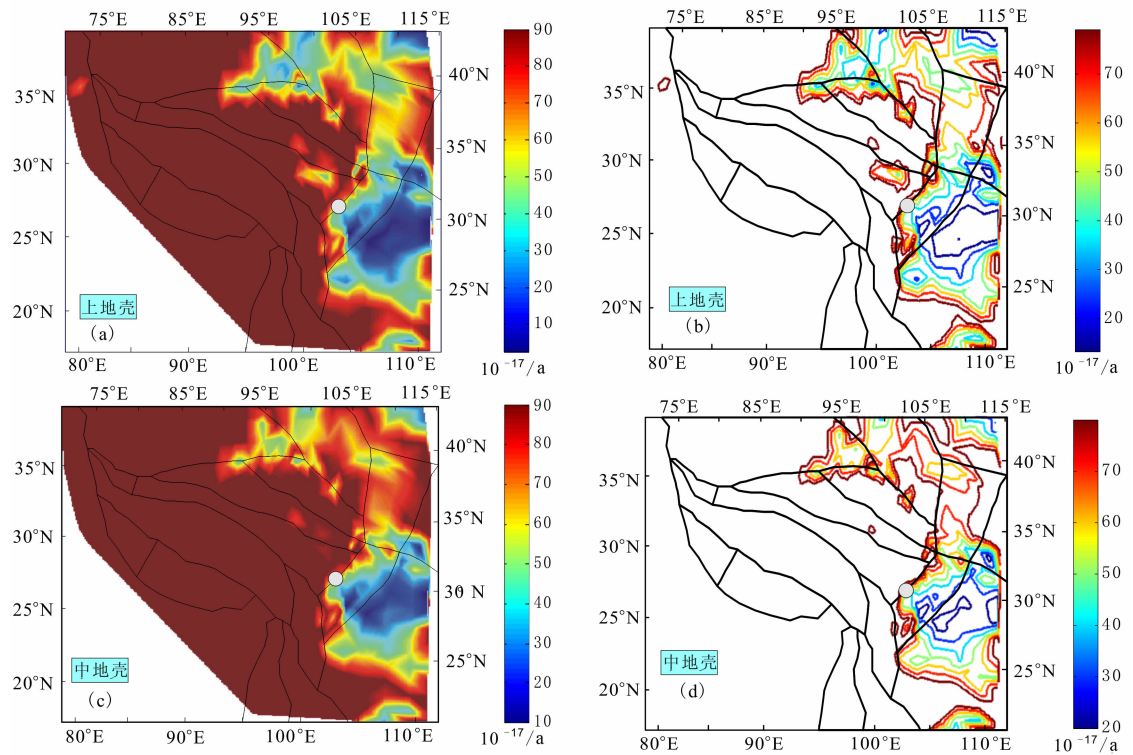


图 5 (a) 研究区上地壳层应变率强度的分布图; (b) 图 5a 红色区(高应变率强度区)以外区域上地壳层应变率强度的等值线图; (c) 研究区中地壳层应变率强度的分布图; (d) 图 5c 红色区(高应变率强度区)以外区域中地壳层应变率强度的等值线图  
 Fig. 5 (a) Distribution of strain rate intensity in upper crust of study zone; (b) Contour map of strain rate intensity except red colour region in Fig. 5a (high strain rate intensity region); (c) Distribution of strain rate intensity in middle crust of study zone; (d) Contour map of strain rate intensity except red colour region in Fig. 5c (high strain rate intensity region)

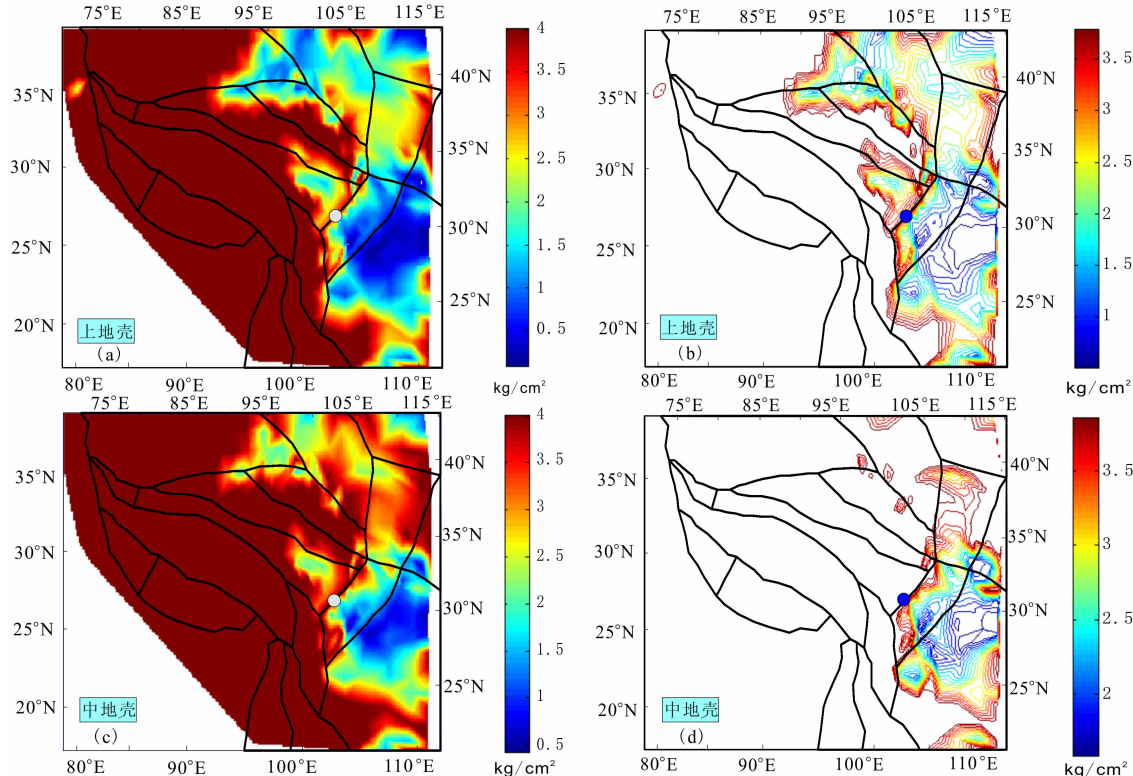


图 6 (a) 研究区上地壳层应变能密度的分布; (b) 图 6a 红色区(高应变能密度区)以外区域上地壳层应变能密度的等值线; (c) 研究区中地壳层应变能密度的分布; (d) 图 6c 红色区(高应变能密度区)以外区域中地壳层应变能密度的等值线图  
 Fig. 6 (a) Distribution of strain energy density in upper crust of study zone; (b) Contour map of strain energy density except red colour region in Fig. 6a (high strain energy density region); (c) Distribution of strain energy density in middle crust of study zone; (d) Contour map of strain energy density except red colour region in Fig. 6c (high strain energy density region)

$141.9 \times 10^{-18}/a$ , 两侧相差近 4 倍. 中地壳层的图像也很类似. 图 5b 及图 5d 给出图 5a 和图 5c 红色区(高应变率强度区)以外区域上、中地壳层的应变率强度等值线图. 图中可见, 龙门山断裂带位于高应变率强度梯度带上. 特别在发生汶川 8.0 级大震的中段, 等值线的基本走向与龙门山断裂带走向基本一致, 其中东侧应变率强度衰减比西侧快.

图 6a 和图 6c 分别是研究区上地壳层与中地壳层应变能密度分布图. 由图可以看出青藏高原除西北部和东部边缘地区外均为高应变能密度区. 在龙门山断裂带及邻近地区存在宽度基本相同, 走向与龙门山断裂带走向一致的高应变能密度带, 在这个带的东西两侧则是应变能密度较低的地区. 图 6b 及图 6d 分别是图 6a 和图 6c 中红色区(高应变能密度区)外上、中地壳层的应变能密度等值线图. 图中显示, 在上地壳层, 龙门山断裂带为高应变能密度梯度带, 断裂带的东侧边比西侧衰减快, 等值线走向与龙门山断裂带一致. 而在中地壳层, 龙门山断裂带也处于高应变能密度带, 其强度在断裂带东侧逐渐向东衰减, 西侧应变能密度高, 而东侧应变能密度较低.

考虑到本文主要研究高原东缘龙门山地区的变化特征, 高原东缘以西红色区的变化细节, 本文暂不研究.

## 5 讨论和结论

本文尝试在几大板块特别是印度板块的强烈俯冲及青藏高原和邻近地区构造块体的相互制约的构造大环境中, 用三维流变非连续变形与连续变形相结合的方法, 探讨汶川 8.0 级大震孕育破裂机理, 取得了一些有意义的结果.

(1) 计算得到青藏及其邻近地区表层速度场分布图像与张培震等<sup>[26]</sup>用 GPS 资料获得的该区速度场分布图像基本一致. 计算得到这个地区的表层模拟震源机制的分布图像与许忠淮用大量地震震源机制结果得到的分布图像及近年来发生大震的震源机制也基本一致. 以上结果表明, 青藏高原及邻近地区由于受印度板块俯冲的强烈挤压及其内部物质东流, 受到高原东侧四川盆地及鄂尔多斯块体坚硬地壳的阻挡, 现今速度场、构造应力场相当复杂. 速度场从南边拉萨块体的北北东方向到其北面的羌塘、昆仑、柴达木块体的东部逐渐转为向东方向. 在龙门山断裂带以西位移方向逐渐向南偏转, 并从川滇菱形块体北部到南部, 位移方向逐步从南东方向转为

南南东方向. 明显显示出青藏高原物质存在着向东并转向南东及南南东方向的水平运动. 青藏高原构造应力场显示四周为逆断层型的应力状态. 在青藏内部以近东西向拉张性质的正断层应力状态为主, 并伴有少量左旋走滑型地震, 如 1997 年玛尼大震及 2001 年昆仑山大震便是左旋走滑型机制. 这些结果均支持青藏高原内的羌塘、昆仑、柴达木、祁连等块体存在物质的“差速”东流的推断. 这为探讨汶川大震的发生机理打下了基础.

(2) 在研究区现今速度场和构造应力场及各构造块体相互制约的大背景下, 计算得到上、中地壳层构造块体边界断层的危险度较高、容易失稳的地段多数与近几十年来发生的七级大震区域基本一致. 包括 1990 年共和 7.0 级大震, 1996 年阿图什 7.0 级大震, 1997 年玛尼 7.9 级大震, 2001 年昆仑山 8.1 级大震及 2008 年改则 6.9 级地震, 玉田 7.3 级地震和汶川 8.0 级大震的发震断层. 图中还显示阿尔金山断裂带的东段和西段、鄂尔多斯块体的西南、喀喇昆仑断裂带东北段与西南段、鲜水河断裂带中段、祁连山断裂带的西北段和阴山断裂带的东段等地段危险度也较高. 表明在青藏高原受到印度板块强烈俯冲及其东缘受到东侧四川盆地及鄂尔多斯块体坚硬地壳的阻挡, 高原物质由北北东转向东, 再转向南东的“差速”水平运动推挤的背景下, 青藏川滇块体系统中块体边界断层的多个部位的应变能已积累到相当的水平, 并达到或接近破裂强度. 通过分别对龙门山断裂带及东西两侧地区水平层地壳模型及原模型但东侧各层介质强度分别与西侧相同两种格局计算, 得到了危险度分布均在龙门山断裂带中段(汶川大震发震断层)与南段减弱, 表明龙门山断裂带东西两侧地势、地壳厚度、分层及物性明显变化对汶川大震的孕育发生均起了关键性的影响. 此外, 可以注意到, 龙门山断裂带南段的上、中地壳层也均为危险度最高的地段, 汶川大震的发生截至到目前并没有对这个地段的大震活动造成大的影响, 汶川大震发震断层的破裂至今没有向南发展. 表明这个地段破裂强度较大, 汶川大震的影响至今不足以使其失稳.

(3) 由应变率强度分布图可知, 在印度板块强烈推挤作用下, 青藏高原除东部和西北部少数边缘地区外均为高应变率强度区, 由于受到高原东侧四川盆地及鄂尔多斯坚硬地壳的阻挡, 青藏高原整个东部边缘地带均接近应变率强度的陡变带, 其中在龙门山断裂带上陡变最为明显, 西侧的应变率强度是东侧近 4 倍. 等应变率强度线走向与龙门山断裂



带走向一致. 而且断裂带东侧衰减比西侧快, 显示了汶川大震逆冲型发震断层地区独特的特征, 与发震断层西侧上盘的逆冲规模大于东侧四川盆地俯冲的事实一致. 龙门山断裂带西侧与东侧四川盆地的地壳厚度相差幅度约 15 km, 龙门山断裂带东西两侧处于地势、上、中、下地壳分层厚度及物性变化最为明显地区, 看来这种格局是导致龙门山断裂带东西两侧应变率强度明显陡变的直接原因. 龙门山断裂带及邻近地区上地壳层的这些分布特征, 与李延兴用 GPS 资料得到的结果比较接近(私人通讯).

(4) 由应变能密度分布图可知, 龙门山断裂带在上、中地壳层中均位于宽度相同其走向与龙门山断裂带走向一致的高能量带中. 在上地壳层, 这个带的东西两侧则是应变能密度较低的地区. 在中地壳层, 断裂带东侧应变能密度迅速向东衰减, 西侧应变能密度高, 而东侧应变能密度较低. 表明在印度板块强烈推挤作用下, 龙门山断裂带中的汶川大震发震断层与青藏高原大多数地区一样, 积累了相当水平的应变能, 而其东西两侧的应变能密度的分布特征, 显示了这个发震断层还同时处于力学上不稳定状态.

(5) 由于资料的限制, 本文采用的力学模型, 对与本文研究的非关键部分做了一些简化处理, 这对计算结果的量值会有一定影响. 相信随着资料不断积累, 这项研究将更完善.

**致谢** 邓起东院士对本文构造块体划分提供了帮助, 李延兴教授为本研究提供了未发表的 GPS 研究结果, 审稿人为本文提出了宝贵修改意见, 在此一并表示衷心感谢.

## 参考文献(References)

- [1] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽等. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断层的滑动速率、复发周期和构造成因. 地球物理学报, 2008, **51**(4):1066~1073  
Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(4):1066~1073
- [2] 陈运泰, 许力生, 张勇等. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告. 2008, <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai.pdf>. (2008-05-25)  
Chen Y T, Xu L S, Zhang Y, et al. Report on the Wenchuan larger earthquake source of May 12, 2008. <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai.pdf>. (2008-05-25)
- [3] Shinji Toda, Jian Lin, Mustapha Meghraoui, et al. 12 May 2008  $M_{7.9}$  Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**: L17305, doi:10.1029
- [4] 滕吉文, 白登海, 杨辉等. 2008 汶川  $M_{8.0}$  地震发生的深层过程和动力学响应. 地球物理学报, 2008, **51**(5):1385~1402  
Teng J W, Bai D H, Yang H, et al. Deep process and dynamic responses associated with the Wenchuan  $M_{8.0}$  earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5):1385~1402
- [5] 王卫民, 赵连锋, 李娟等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. 地球物理学报, 2008, **51**(5):1403~1410  
Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the  $M_{8.0}$  Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5):1403~1410
- [6] 陈连旺, 张培震, 陆远忠等. 川滇地区强震序列库仑破裂应力加载卸载效应的数值模拟. 地球物理学报, 2008, **51**(5):1411~1421  
Chen L W, Zhang P Z, Lu Y Z, et al. Numerical simulation of loading/unloading effect on Coulomb failure stress among strong earthquakes in Sichuan-Yunnan area, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5):1411~1421
- [7] 刘超, 张勇, 许力生等. 一种矩张量反演新方法及其对 2008 年汶川  $M_{8.0}$  地震序列的应用. 地震学报, 2008, **30**(4):329~339  
Liu C, Zhang Y, Xu L S, et al. A new technique for moment tensor inversion with applications to the 2008 Wenchuan  $M_{8.0}$  earthquake sequence. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2008, **30**(4):329~339
- [8] 孙建宝, 梁方, 沈正康等. 汶川  $M_{8.0}$  地震 InSAR 形变观测初步分析. 地震地质, 2008, **30**(3):789~795  
Sun J B, Liang F, Shen Z K, et al. InSAR deformation observation and preliminary analysis of the  $M_{8.0}$  Wenchuan earthquake. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(3):789~795
- [9] Burchfiel B C, Chen Z, Liu Y, et al. Tectonics of Longmen Shan and adjacent regions, Central China. *Int Geol Rev*, 1995, **37**:661~736
- [10] Burchfiel B C. New technology: New geological challenges. *Geol Soc Amer Today*, 2003, **14**(2):4~10
- [11] 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. *GSA Today*, 2008, **18**(7):4~11
- [12] Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H, et al. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 2001, **414**:738~742
- [13] 陈祖安, 林邦慧, 白武明. 1997 年玛尼地震发生对青藏川滇地区构造块体系统稳定性影响的三维 DDA+FEM 方法数值模拟. 地球物理学报, 2008, **51**(5):1422~1430  
Chen Z A, Lin B H, Bai W M. 3-D numerical simulation on influence of 1997 Mani earthquake occurrence to stability of tectonic blocks system in Qingzang and Chuandian zone using DDA + FEM method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),

- 2008, **51**(5):1422~1430
- [14] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析. 北京:清华大学出版社,1997
- Shi G H. Numerical Manifold Method and Discontinuous Deformation Analysis. Beijing: Tsinghua University Press, 1997
- [15] Cai Y, He T, Wang R. Numerical simulation of dynamics process of the Tangshan earthquake by a new method-LDDA. *Pure Appl. Geophys.*, 2000, **157**:2083~2104
- [16] 陈祖安,白武明,林邦慧等. 1966 年以来华北地区一系列七级大震破裂过程的数值模拟. 地球物理学报,2003, **46**(3):373~381
- Chen Z A, Bai W M, Lin B H, et al. Numerical simulation for rupture processes of a series of strong earthquakes ( $M_s > 7$ ) in north China since 1966. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(3):373~381
- [17] 白武明,林邦慧,陈祖安. 1976 年唐山大震发生对华北地区各地块运动与变形影响的数值模拟研究. 中国科学,2003, **33**(增刊):99~107
- Bai W M, Lin B H, Chen Z A. Numerical simulations of deformation and movement of blocks within North China in response to 1976 Tangshan earthquake. *Science in China (D)*, 2003, **46**(Suppl.):141~152
- [18] 张培震,邓起东,张国民等. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学(D),2003, **33**(增刊):12~20
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China. *Science in China (D)*, 2003, **46**(Suppl.):13~24
- [19] 滕吉文. 固体地球物理学概论. 北京:地震出版社,2003
- Teng J W. Introduction to Solid Geophysics (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2003
- [20] 丁志峰,何正勤,吴建平. 青藏高原地震波三维速度结构的研究. 中国地震,2001, **17**(2):202~209
- Ding Z F, He Z Q, Wu J P, et al. Research on the 3-D seismic velocity structures in Qinghai-Xizang plateau. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2001, **17**(2):202~209
- [21] 刘启元,陈九辉,李顺成等. 汶川  $M_s$ 8.0 地震:川西流动地震台阵观测数据的初步分析. 地震地质,2008, **30**(3):584~596
- Liu Q Y, Chen J H, Li S C, et al. The  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake: preliminary results from the western Sichuan mobile seismic array observations. *Seismology and Geology*, 2008, **30**(3):584~596
- [22] 王椿镛,吴建平,楼海等. 川西藏东地区的地壳 P 波速度结构. 中国科学(D辑),2003, **33**(Suppl.):181~189
- Wang C Y, Wu J P, Lou H, et al. P-wave crustal velocity structure in western Sichuan and eastern Tibetan region. *Science in China (Series D)*, 2003, **46**(Suppl.):254~265
- [23] 王椿镛,吴建平,楼海等. 青藏高原东部壳幔速度结构和地幔变形场的研究. 地学前缘,2006, **13**(5):349~359
- Wang C Y, Wu J P, Lou H, et al. Study of crustal and upper mantle's structure and mantle deformation field beneath the eastern Tibetan plateau. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2006, **13**(5):349~359
- [24] 楼海,王椿镛,吕智勇等. 2008 年汶川  $M_s$ 8.0 级地震的深部构造环境——远震 P 波接收函数和布格重力异常的联合解释. 中国科学(D辑),2008, **38**(10):1207~1220
- Lou H, Wang C Y, Lü Z Y, et al. Deep tectonic setting of the 2008 Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake in southwestern China—Joint analysis of teleseismic P-wave receiver functions and Bouguer gravity anomalies. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2008, **38**(10):1207~1220
- [25] 张东宁,许忠淮. 青藏高原现代构造应力状态及构造运动的三维弹性数值模拟. 中国地震,1994, **10**(2):136~143
- Zhang D N, Xu Z H. Three dimensional elasto-visco numerical simulation of Qinghai-Xizang Plateau's recent tectonic stress field and it's motion. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1994, **10**(2):136~143
- [26] Zhang P Z, Shen Z, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 2004, **32**:809~812
- [27] 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
- Xu Z H. A present-day tectonic stress map for eastern Asia region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, **23**(5):492~501
- [28] 王仁,孙荀英,蔡永恩. 华北地区近 700 年地震序列的数学模拟. 中国科学(B辑),1982, **12**(8):745~753
- Wang R, Sun X Y, Cai Y E. Numerical simulation on sequence of about 700 earthquakes in the northern China. *Science in China (B)* (in Chinese), 1982, **12**(8):745~753
- [29] 王阎昭,王恩宁,沈正康等. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率. 中国科学(D辑),2008, **38**(5):582~597
- Wang Y Z, Wang N N, Shen Z K, et al. GPS constrained inversion of slip rates along major faults of the Sichuan-Yunnan region, China. *Science in China (D)* (in Chinese), 2008, **38**(5):582~597

(本文编辑 胡素芳)