

doi:10.3799/dqkx.2016.102

# 甘东南及邻区 7 级以上强震数值模拟

杨兴悦<sup>1</sup>, 曾文浩<sup>1\*</sup>, 王 燕<sup>1</sup>, 李少华<sup>1</sup>, 孙召华<sup>2</sup>

1. 甘肃省地震局, 甘肃兰州 730000

2. 河南省地震局, 河南郑州 450016

**摘要:** 对强震发生后周围断层及未来强震形势的影响研究具有非常重要的意义。青藏高原东北缘强震频发, 对该区的历史强震进行研究很有必要。以青藏高原东北缘及邻区为目标建立 3D 黏弹性有限元模型, 依据中国大陆 I 级块体和青藏高原 II 级块体划分及活动断裂分布确定模型块体边界及断裂位置, 使用 GPS 观测资料作为模型边界条件, 数值模拟 1900 年以来 7 级以上强震发生的动力学过程。计算结果表明: ①青藏高原东北缘及邻区区域水平构造应力场特征大致呈从西向东, 从南向北减小分布。②模拟结果说明强震主要发生在背景场应力和强震引起的等效应力加载的断层上。③历史强震序列对 1970 年以来地震的影响: 康定地震加速触发了炉霍地震的发生; 康定、炉霍地震对松潘地震无加速触发作用; 康定、炉霍、松潘地震对共和地震无加速触发作用; 炉霍、松潘、共和地震对汶川地震的影响较小; 汶川地震延缓了芦山地震的发生。

**关键词:** 青藏高原东北缘; 黏弹性; 有限元; 强震; 数值模拟; 地震。

中图分类号: P315

文章编号: 1000-2383(2016)07-1238-11

收稿日期: 2015-12-18

## Numerical Simulation on Magnitude 7 or over Earthquakes in Southeast Gansu Province and Its Neighboring Areas

Yang Xingyue<sup>1</sup>, Zeng Wenhao<sup>1\*</sup>, Wang Yan<sup>1</sup>, Li Shaohua<sup>1</sup>, Sun Zhaohua<sup>2</sup>

1. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China

2. Earthquake Administration of Henan Province, Zhengzhou 450016, China

**Abstract:** It is very important to study the influence of the strong earthquake on the surrounding fault and its development trend in future. Strong earthquakes occurred frequently in the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, thus it is necessary to study the history of strong earthquakes in this region. We construct the 3D viscoelastic finite element model of the northwest margin and its surroundings of Qinghai-Tibet Plateau, on the basis of level I blocks in China continent and level II blocks in Qinghai-Tibetan Plateau and distribution of active faults to determine the model block boundary and fault location in this paper. In addition, the dynamic process of strong earthquakes ( $M_s \geq 7.0$ ) since 1900 is simulated using GPS observation data as boundary conditions. The calculation results are as follows. (1) The regional horizontal tectonic stress field in northeastern margin of Tibetan Plateau is characterized by gradual decrease from west to east and decrease from south to north as well. (2) The simulation results show that the strong earthquakes are mainly caused by the equivalent stress loaded on the background field and the strong earthquakes. (3) The effects of historical earthquake sequence to the earthquakes since 1970 are also discussed. It is concluded that the Kangding earthquake triggered the occurrence of Luhuo earthquake acceleratedly, while the effect of Kangding earthquake, Luhuo earthquake and Songpan earthquake on Gonghe earthquake is not obvious, meanwhile, the influence of Luhuo earthquake, Songpan earthquake and Gonghe earthquake on the Wenchuan earthquake is little; and the Wenchuan earthquake delayed the occurrence of Lushan earthquake.

**Key words:** northeastern margin of Qinghai-Tibetan plateau; viscoelastic; finite element; strong earthquake; numerical simulation; earthquake.

**基金项目:** 甘肃省地震局地震科技发展基金项目面上基金(No.2013M03)。

**作者简介:** 杨兴悦(1981-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事数值模拟与地震前兆质量管理。E-mail: yxy\_wy@163.com。

\* **通讯作者:** 曾文浩, E-mail: jczxzh@163.com

**引用格式:** 杨兴悦, 曾文浩, 王燕, 等, 2016. 甘东南及邻区 7 级以上强震数值模拟. 地球科学, 41(7): 1238-1248.

## 0 引言

青藏高原东北缘动力学环境构造复杂,大震频繁发生(李德威等,2014),近年来该地区成为青藏高原动力学研究的重要区域,该区的历史强震研究对未来强震形势的判断具有重要的意义。青藏高原东北缘主要指青藏高原东北部及其毗邻区域,青藏高原东北部主要包含巴颜喀拉、东昆仑—柴达木和祁连等青藏高原部分 II 级块体(刘明军等,2008)。该区构造运动及地貌反差强烈,被深大断裂交错切割,是地壳最易变形和物质容易流动的地区(丁国瑜,1991)。区内存在 NWW-NW、NEE 向大型构造边界断裂(包含祁连—海原断裂、东昆仑—西秦岭断裂以及阿尔金断裂)和 NNW 向断裂,以及由这些断裂分割构成的许多构造单元,这些构造形成了该区域复杂的活动构造系统(虢顺民等,2000)。青藏高原东北缘强震频发,在过去近百年时间里,共发生 7 级以上强震 18 次,其动力学环境主要受控于印度板块以 NE 向水平强烈挤压青藏高原而产生的构造应力场。

从 Steketee(1958)第一次将位错理论引入地学问题研究以来,位错理论经历了几十年的发展,同时随着 GPS 等空间大地测量技术的发展(李煜航等,2015),区域性甚至全球性的水平形变监测能力逐步提升,位错理论在模拟断层活动与地面形变场的关系方面也得到了相应的发展。随着数值模拟技术的进步和对地球动力学过程认识的不断深入,数值模拟未来的发展方向应该是建立更接近实际的三维动力学模型,同时考虑多场耦合作用,模拟断层活动的规律(邓志辉等,2011)。

笔者在前人工作的基础上使用 ANSYS 有限元软件以青藏高原东北缘及邻区为目标建立较为精细的黏弹性有限元模型,研究 1900 年以来该区发生的  $M_s \geq 7.0$  地震的应力演化过程,尝试为地震预测研究提供一种具有力学含义的辅助支撑技术。

## 1 3D 黏弹性有限元模型

用数值模拟方法进行地学问题研究时,理论上建立与实际地质结构越接近的模型计算结果越好,同时不得不兼顾所使用的数值模拟系统的处理能力以及具体模拟过程的计算效率,因此建立一个尽可能接近实际且能够顺利完成模拟过程的有限元模型对计算结果至关重要。下面简要介绍模型相关参数等。

### 1.1 模型区域及活动断裂选取

本文以青藏高原东北缘地区为研究区域,选择地理坐标范围为  $90.5^\circ \sim 109.5^\circ \text{E}$ ,  $27.5^\circ \sim 40.5^\circ \text{N}$  的区域建立有限元模型。青藏高原地质结构复杂,在文中建立模型时只考虑了活动块体之间的大断裂,块体分区采用张培震等(2003)、邓起东等(2014)研究结果,研究主体区域主要涉及华南、川滇、巴颜喀拉、东昆仑—柴达木、祁连、阿拉善等部分块体及青藏块体东部边界构造带(图 1 中简称块体边界构造带)。为了简化模型,在建模过程中忽略块体内的小型断裂,将大型活动断裂处理为弱化带,通过改变断层的物性参数使其容易变形。模型中的大断裂主要包含有喀喇昆仑—嘉黎断裂、金沙江断裂、玛尼—玉树断裂、鲜水河断裂、达日断裂、昆仑—玛沁断裂、西秦岭北缘断裂、阿尔金断裂、海原断裂、龙门山断裂(张培震等,2003)。本研究中的甘东南地区是研究的重点之一,因此笔者考虑了该区域及邻区的一些小断裂,包括临潭—宕昌断裂、礼县—罗家堡断裂、迭部—白龙江断裂、成县盆地北缘断裂、文县断裂、塔藏断裂、虎牙断裂、青川—平武断裂、略阳断裂、月河断裂、灌县—安县断裂等。上述断裂带的倾角并不都是垂直的,石耀霖和朱守彪(2003)的研究表明我国浅表地震类型以走滑为主,震源机制的主应力轴倾角接近垂直或水平,因此相对本研究较大的区域而言,将模型中的大型断裂简化为垂直断裂。汶川地震为走滑兼逆冲型,将模型中的龙门山断裂带上地壳分为上下两层,由于该地区高程差别较大,所以上地壳上层厚度为  $7.3 \sim 13.1 \text{ km}$ ,上地壳下层厚度为  $5 \text{ km}$ ,上层倾角为  $70^\circ$ ,下层倾角为  $30^\circ$ (张培震等,2012)。刘杰等(2013)根据四川台网记录的地震波形资料,反演得到的芦山地震震源机制解倾角为  $39^\circ$ ,因此在建立模型时芦山地震所在断层倾角定为  $39^\circ$ 。模型示意如图 1 所示,图中与地震相关内容在 2.3 节中介绍。

### 1.2 模型物性参数选取

青藏高原地壳厚度、波速、密度并不均匀,因此建立较为精细的模型进行计算,其结果可能更为接近实际。Laske *et al.*(2014)研究的全球地壳模型参数精度达到  $1^\circ \times 1^\circ$ ,模型分为水层、冰层、上沉积层、中沉积层、下沉积层、上地壳、中地壳和下地壳,共 8 层。该 crust1.0 地壳模型结果在网站公开使用。本文研究区域不涉及水层和冰层,沉积层也比较薄,因此采用该研究结果的上、中、下地壳参数,建立模型厚度分别为  $10.2 \sim 36.1 \text{ km}$ 、 $11.2 \sim 23.8 \text{ km}$ 、 $5.9 \sim 18.8 \text{ km}$ 。模型中的大型断层宽度为  $20 \text{ km}$ ,位于甘东

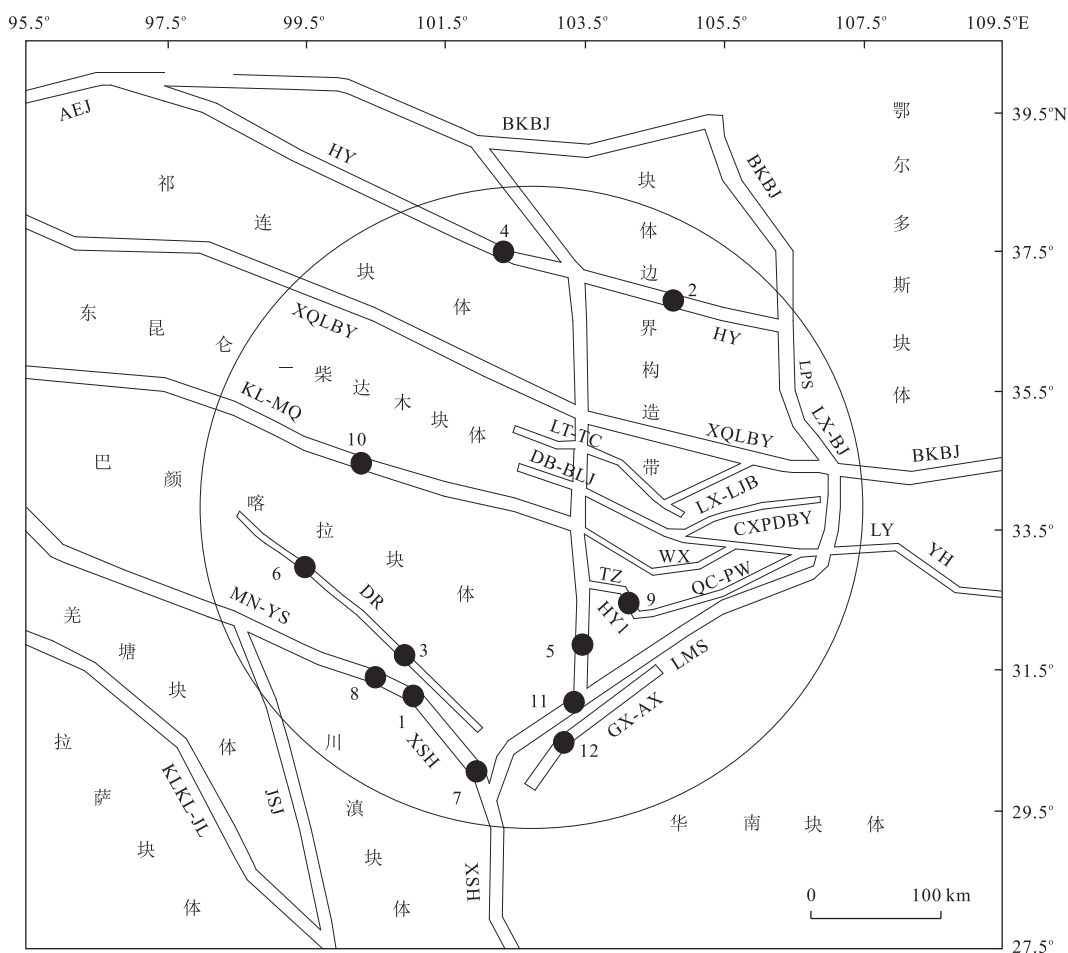


图 1 模型示意

Fig.1 Sketch of the model

黑色圆点表示震中位置, 数字 1~12 表示表 1 中地震发生的顺序, 圆点为研究主体区域. 青藏高原断裂带名称采用张培震等(2003), 其他地区断裂带名称采用 mapsis 软件中的“中国断层—邓起东”. KLKL-JL. 喀喇昆仑—嘉黎断裂; JSJ. 金沙江断裂; MN-YS. 玛尼—玉树断裂; XSH. 鲜水河断裂; DR. 达日断裂; KL-MQ. 昆仑—玛沁断裂; XQLBY. 西秦岭北缘断裂; AEJ. 阿尔金断裂; HY. 海原断裂; LPS. 六盘山; LT-TC. 临潭—宕昌断裂; LX-LJB. 礼县—罗家堡断裂; DB-BLJ. 迭部—白龙江断裂; CXPD. 成县盆地北缘断裂; WX. 文县断裂; TZ. 塔藏断裂; HY1. 虎牙断裂; QC-PW. 青川—平武断裂; LY. 略阳断裂; YH. 月河断裂; LMS. 龙门山断裂; GX-AX. 灌县—安县断裂; BKB. 板块边界

南地区及邻区的小断层宽度为 10 km.

模型上地壳采用弹性体, 中、下地壳采用黏弹性体, 根据全球地壳模型参数将地壳各层分成的小块体假定为弹性各向同性介质, 依据岩石密度、横波速度  $V_P$  及纵波速度  $V_S$ , 推算出泊松比 (张学民等, 2001) 及杨氏模量  $E$  (张东宁和高龙生, 1989).

$$\nu = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)}, \quad (1)$$

$$E = \frac{V_P^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}. \quad (2)$$

依据全球地壳模型参数及上述公式, 计算出上、中、下地壳泊松比和杨氏模量分别为 0.24~0.25、0.24~0.26、0.25~0.26 和  $8.34 \times 10^{10} \sim 8.59 \times 10^{10}$  Pa、 $9.24 \times 10^{10} \sim 9.80 \times 10^{10}$  Pa、 $10.4 \times 10^{10} \sim$

$11.8 \times 10^{10}$  Pa. 断裂带杨氏模量为周围块体的 1/3, 泊松比较周围区域高 0.02.

本研究中模型上地壳采用弹性介质, 中地壳和下地壳采用黏弹性介质, 关于青藏高原中、下地壳黏滞系数, 一些学者做过一些相关的研究 (石耀霖和曹建玲, 2008; 杨强和党亚民, 2010; 陈连旺等, 2011). 通过对比, 笔者认为石耀霖和曹建玲 (2008) 研究结果较为细致, 因此, 本文中地壳采用该研究成果 25 km 深度处的黏滞系数, 为  $10^{21} \sim 5 \times 10^{22}$  Pa · s, 下地壳采用该研究成果 50 km 深度处的黏滞系数, 为  $5 \times 10^{20} \sim 10^{22}$  Pa · s.

### 1.3 本构关系

地学问题比较复杂, 用数值模拟方法研究地学问题时尽可能简化模型以减小计算量, 同时还要考

虑板块变形、深部物质流变以及断层等对构造应力应变场的影响.模拟过程中将中、下地壳介质视为理想黏弹性体,本构关系使用 PRONY 级数,其核方程如下(詹自敏等,2011):

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_G} G_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right), \quad (3)$$

$$K(t) = K_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_K} K_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^K}\right), \quad (4)$$

其中,  $G_{\infty}$  和  $G_i$  为剪切模量,  $K_{\infty}$  和  $K_i$  是体积模量,  $G_{\infty}$  和  $K_{\infty}$  为时间无穷大时剪切模量和体变模量的取值,  $G_i$  和  $K_i$  分别为第  $i$  个 PRONY 元件的剪切模量和体变模量.  $n_G$  和  $n_K$  为 PRONY 元件的个数, 简单情况下取一个即可.  $t$  为时间,  $\tau_i^G$  和  $\tau_i^K$  分别为剪切模量和体变模量的松弛时间, 也为相对时间.

### 1.4 单元类型及网格划分

ANSYS 软件可根据研究需求选择适合的单元类型.在本文中,选择具有二次位移模式的实体单元 solid187,该单元可以更好地模拟不规则模型,该单元比较适合研究 3D 地学问题.划分网格采用四面体自由划分,选择单元平均长度为 20 km,划分网格后模型共生成 310 681 个单元,452 751 个节点.

### 1.5 边界条件

选取中国大陆 2009—2011 年 GPS 水平运动速率资料,采用 4 点样条插值法对模型边界节点进行插值作为模型的位移边界条件,由于无法知道初始应力条件,因而假定初始为零,开始运动后边界为匀速运动,在边界上施加 50 km,即 10 万年的位移边

界条件.文中使用的 GPS 观测资料和模型中施加的位移边界条件均以欧亚大陆为参考系.

## 2 模拟结果及分析

### 2.1 区域水平构造背景位移场模拟结果

模拟强震动力学演化过程前,将计算出的模拟速度场结果与实际观测的 GPS 速度场结果对比,以验证模型的合理性,若二者结果差别较大,说明模型需要优化.通过计算比较,认为二者大部分点比较吻合,反映了较好的一致性,如图 2 所示.从图中可以看出研究主体区域的点吻合较好,说明采用这种 GPS 插值约束具有合理性.由于部分区域 GPS 站点较为稀疏,可能是造成模拟结果与实测结果少部分点有差别的主要原因,另外块体之间的大型滑动断裂在模型边界加载位移容易变形,也可能是 GPS 观测结果与模拟结果有差异的一个原因.在印度板块持续向欧亚大陆作用下,青藏高原东北缘及邻区区域构造水平应力场特征大致呈从西向东,从南向北减小分布;青藏高原东北缘南部大致呈水平向位移,北部呈东北方向位移,且位移较小;青藏高原东北缘中部东向位移较大,并形成了围绕喜马拉雅构造结旋转的特征,这与张培震等(2003)、陈连旺等(2011)的研究结果是一致的.

### 2.2 区域水平构造背景应力场模拟结果

在青藏高原东北缘的主体区域设计了 4 条路径线(图 3),从西向东、从南向北横跨活动断裂带分别

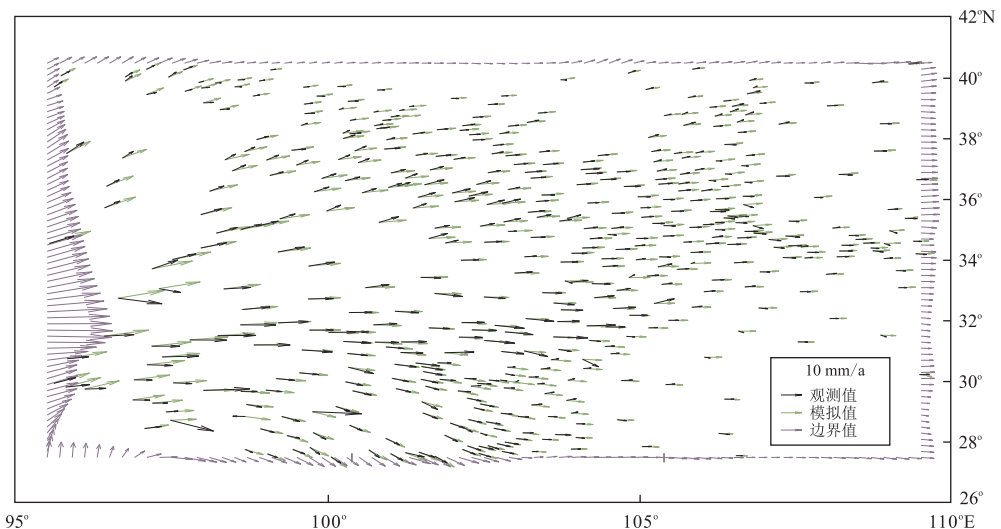


图 2 模型边界条件及地表水平速度场模拟结果与观测结果对比

Fig.2 Contrast of the boundary condition of the model and between simulation results of surface horizontal velocity field and observation results



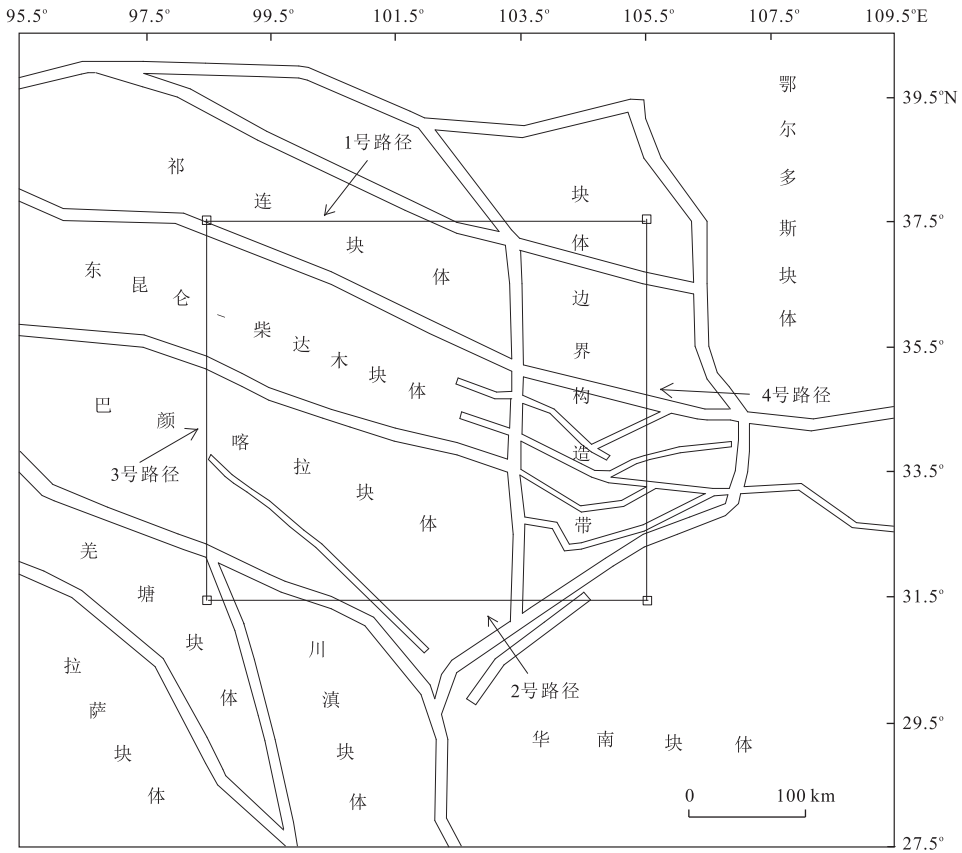


图 3 路径示意

Fig.3 Sketch map of the path

描述地表、地下 10 km 和地下 15 km 处水平构造背景场等效应力沿路径方向的变化特征.等效应力是反映介质趋于屈服的程度,等效应力增大,有利于地壳介质失稳而加速孕震进程;反之,等效应力减小,则不利于介质失稳而减缓孕震进程(杨兴悦等, 2013a).

其中等效应力定义为:

$\sigma_e =$

$$\left\{ \frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma^2_{xy} + \sigma^2_{yz} + \sigma^2_{zx}) \right] \right\}^{1/2}, \quad (5)$$

式(5)中,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$  为应力张量分量.等效应力单位为 Pa.

模拟结果显示 1 号路径线通过的祁连山块体等效应力中部比东部大,从西向东迅速递减,鄂尔多斯块体内等效应力变化不明显; 2 号路径线主要通过的羌塘及川滇块体等效应力从西向东逐渐递减,川滇块体等效应力较低,变化也较小; 3 号路径通过的羌塘、巴颜喀拉块体的等效应力较大,但从南向北变化

不明显; 4 号路径通过的川滇块体、甘东南地区等效应力从南向北减小,但幅度较小(图 4).从图 3 中可以看出,地表、地下 10 km 和地下 15 km 处等效应力变化基本一致,地表和地下 10 km 处的单点等效应力变化较大是断层通过的位置.

### 2.3 强震系列模拟结果

发生一次强震会引起区域应力场的调整,对周围断层有很大的影响(万永革等, 2007; 陈连旺等, 2008; 李玉江等, 2013, 2014), 具有深刻的动力学内涵,蕴含着大震孕育过程的重要信息.利用本文的青藏高原东北缘 3D 有限元模型,以 1900 年以来甘东南地区为中心 400 km 范围内发生的 7 级以上地震为目标进行地震引起的应力场变化研究,震源参数见表 1.

#### 2.3.1 强震序列引起区域应力场变化 Lu et al.

(2011)、杨树新等(2012)及杨兴悦等(2013a)在模拟计算时通过降刚法模拟震源区部分地质体丧失承载能力而引起的区域应力场调整变化,取得了预期成果.本文也采用降刚法模拟强震的发生,对于断层采用震中降刚最大,向两侧分别递减的方式.研究区内

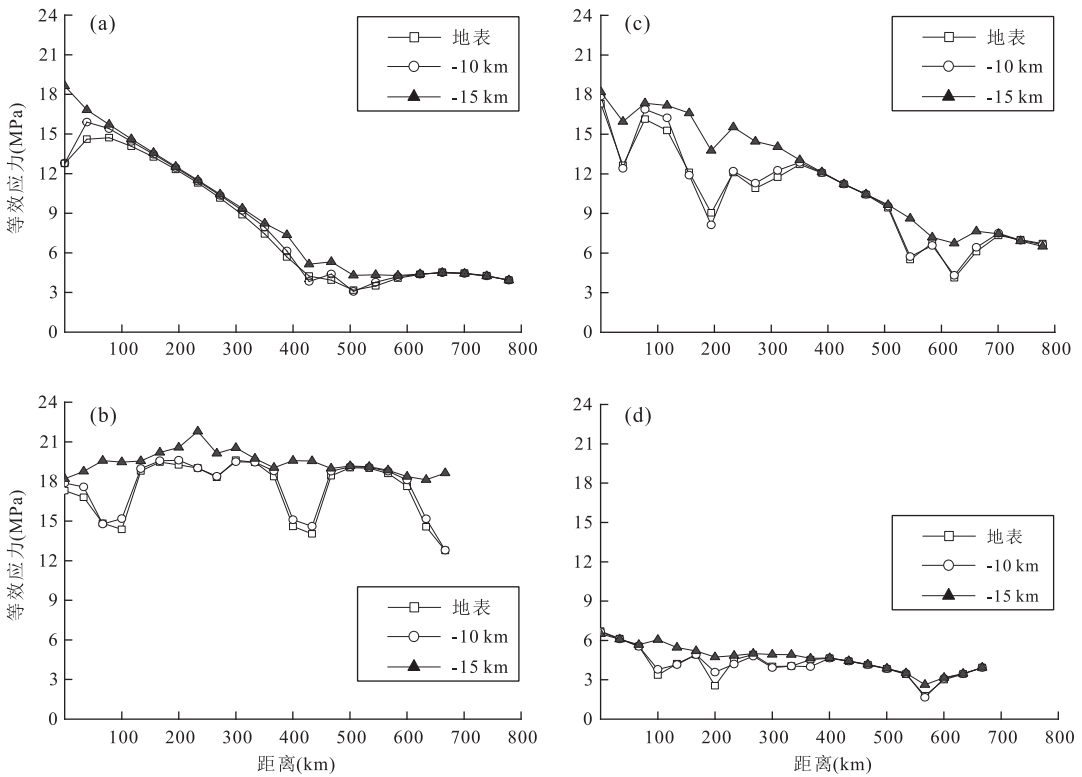


图 4 青藏高原东北缘等效应力变化曲线

Fig.4 The equivalent stress curve in the Northeastern of Qinghai-Tibet Plateau  
a.1 号路径; b.2 号路径; c.3 号路径; d.4 号路径

表 1 1900 年以来青藏高原东北缘发生的 7 级以上地震参数

Table 1 Earthquake parameters( $M_s \geq 7.0$ ) in the Northeastern of Qinghai-Tibet Plateau since 1900

序号	时间	地点		震级 $M_s$	破裂长度(km)	水平错动(m)	杨氏模量降低百分比(%)	参数来源
		震中	经度(°) 纬度(°)					
1	1904-08-30	道孚	101.1 31.0	7.0	27	3.0	16.5	*
2	1920-12-16	海原	104.9 36.7	8.5	237	10.0	65.0	刘百箴等, 2008
3	1923-03-24	炉霍	101.0 31.5	7.3	55	3.0	39.0	*
4	1927-05-23	古浪	102.2 37.7	8.0	192	6.3	28.8	*
5	1933-08-25	叠溪	103.4 31.9	7.5	72	4.4	15.0	*
6	1947-03-17	达日	99.5 33.3	7.7	90	5.0	25.0	戴华光等, 1996
7	1955-04-14	康定	101.8 30.0	7.5	72	4.4	19.0	*
8	1973-02-06	炉霍	100.7 31.3	7.6	90	3.6	39.3	唐荣昌等, 1976
9	1976-08-16	松潘	104.1 32.6	7.2	40	3.5	39.3	*
10	1990-04-26	共和	100.3 36.1	7.0	37	2.7	14.0	王文萍和王庆良, 1999
11	2008-05-12	汶川	103.4 31.0	8.0	330	4.9	24.0	徐锡伟等, 2008
12	2013-04-20	芦山	103.0 30.3	7.0	27	3.0	16.7	*

注:表中地震三要素来自中国地震台网;部分断层破裂参数直接来自文献,部分(带\*)由冉洪流(2011)回归分析得到的公式计算得出;杨氏模量降低百分比是根据地震位错参数在模型中实际计算得出的,具体做法是通过降刚法降低震源所在断层的杨氏模量,经多次尝试使降刚后产生的断层位错与强震发生时产生的位错一致,即算出杨氏模量降低百分比。

部分强震引起的断层破裂长度及错动距离采用相关文献研究结果(唐荣昌等, 1976;戴华光等, 1996;王文萍和王庆良, 1999;刘百箴等, 2008;徐锡伟等, 2008;冉洪流, 2011),冉洪流(2011)对中国西部地区 30 个大地震震级及发震断裂的活动参数和破裂参

数资料回归分析得出地震破裂参数与震级的经验关系,该经验公式具有合理性.本研究中部分地震断层参数无法直接查到相关文献,采用该经验公式(冉洪流, 2011)计算得出。

在背景构造应力场下,通过降刚使其产生的位

移与发生地震后导致地表位错一致.由于各次地震震级大小不等、断层走向不同、区域应力场大小及方向不同,12次地震震源处的弹性模量降低百分比也不等,通过计算降低量最多的为1920年海原8.5级地震,最少的为1990年共和7.0级地震,弹性模量降低百分比见表1.计算时按地震发生的时间顺序逐个累加,12次地震的模拟结果如图5a~5n所示.图中所显示的是地震后与地震前各节点的等效应力差,即各次地震所引起的等效应力变化,均为地下10 km处的等效应力值.文中用等效应力描述地震发生的过程,并通过应力值的变化分析地震之间的相互影响.从等效应力演化过程中可看出之前发生的地震对后续地震的影响以及研究区内等效应力变化过程.

通过模拟计算,除第1次地震外,在等效应力增加的区域发生了5次强震,分别为1920年海原 $M_s8.5$ 、1927年古浪 $M_s8.0$ 和1955年康定 $M_s7.5$ 地震、1976年松潘 $M_s7.2$ 和2008年汶川 $M_s8.0$ 级地震;在等效应力增加与减小的过渡区域发生了2次强震,分别为1933年叠溪 $M_s7.5$ 和1947年达日 $M_s7.7$ 地震;在等效应力减小的区域发生了4次强震,分别为1923年炉霍 $M_s7.3$ 、1973年炉霍 $M_s7.6$ 、

1990年共和 $M_s7.0$ 地震和2013年芦山 $M_s7.0$ .上述系列强震发生后,认为地震发生在加载、卸载和应力急剧过渡区域这几种情况都存在,充分说明地质构造具有复杂性,不仅与强震相互影响有关,还与背景场应力有关.在模拟过程中地球介质参数、边界位移条件、地震破裂参数以及仪器震中是否与实际震中完全一致等可能都是影响模拟结果的因素,因此每个地震需要具体分析讨论.

一般认为,区域等效应力增大有利于介质失稳加速孕育地震.强震发生在等效应力增加的区域容易理解,因此本文重点讨论发生在应力加载与卸载过渡区及卸载区域的地震.在等效应力增加与减小的过渡区域发生了2次地震,前几次地震都使震源区等效应力处于加载状态,总体来说这两次强震震源区等效应力处于加载状态,只是最近一次地震使其具有卸载作用.在等效应力减小的区域发生的4次强震,1923年炉霍7.3级地震前的两次强震对其震源区邻区应力加载非常明显;1904年炉霍7.3级地震使1973年炉霍7.6级地震震源区应力加载,1947年达日地震使1990年共和7.0级地震震源区应力大幅增加,1955年康定地震使2013年芦山7.0级地震震源区应力加载明显,但之后几次强震使其

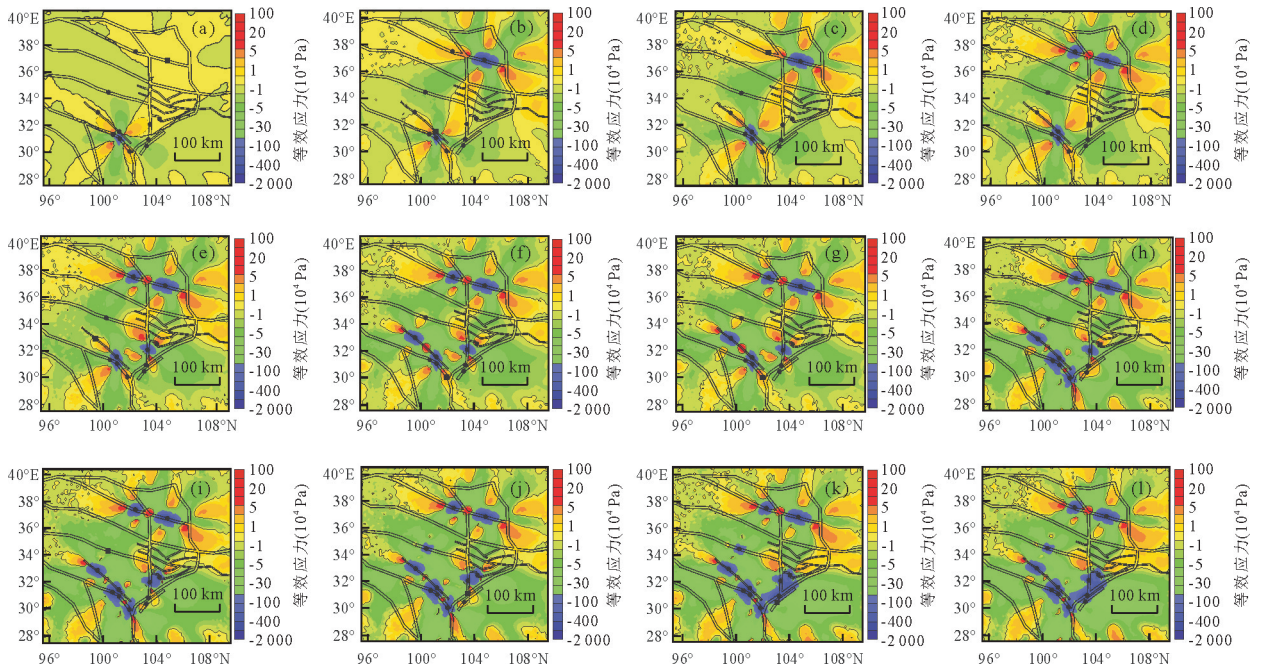


图5 模拟地震引起的等效应力变化

Fig.5 The equivalent stress variation caused by earthquakes

a.第1个地震(道孚  $M_s7.0$ );b.第2个地震(海原  $M_s8.5$ );c.第3个地震(炉霍  $M_s7.3$ );d.第4个地震(古浪  $M_s8.0$ );e.第5个地震(叠溪  $M_s7.5$ );f.第6个地震(达日  $M_s7.7$ );g.第7个地震(康定  $M_s7.5$ );h.第8个地震(炉霍  $M_s7.6$ );i.第9个地震(松潘  $M_s7.2$ );j.第10个地震(共和  $M_s7.0$ );k.第11个地震(汶川  $M_s8.0$ );l.第12个地震(芦山  $M_s7.0$ );虚线为0 pa线,●为地震震中,■为下一次地震发生的位置

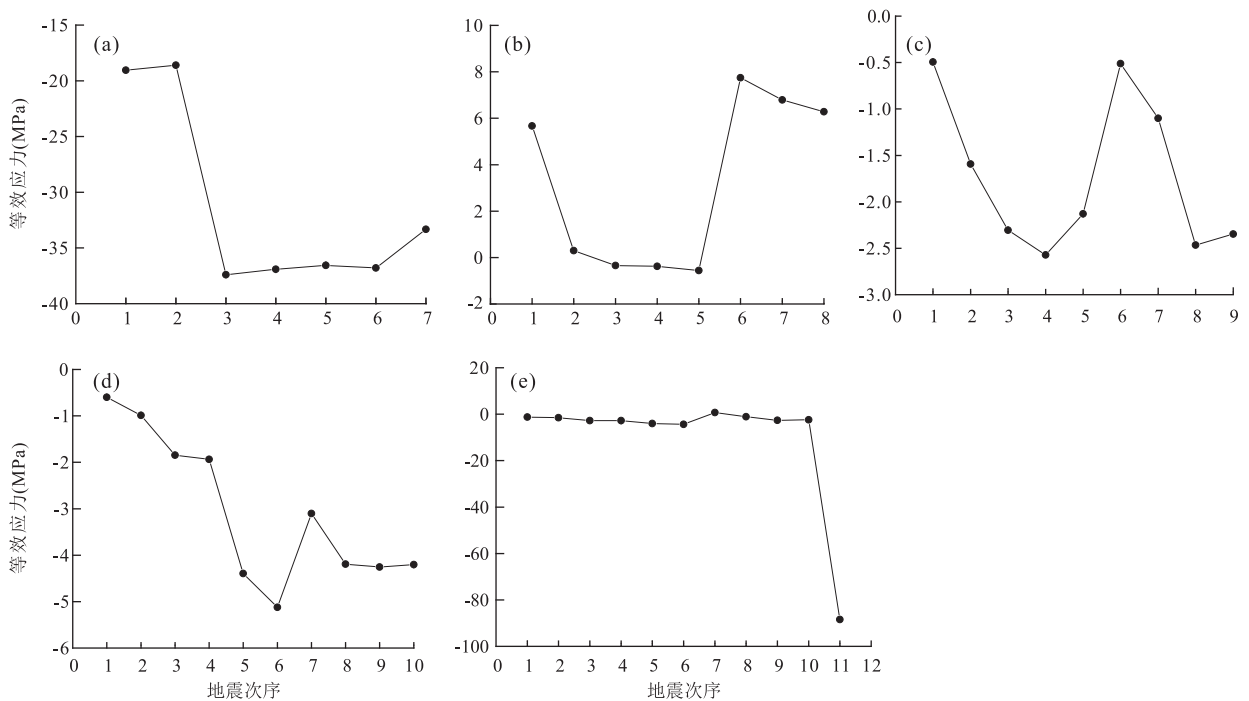


图 6 历史地震对 1970 年后地震的影响

Fig.6 Influence on the earthquakes since 1970 from the previous earthquakes

地震次序见表 1; a.1973 年炉霍  $M_s7.6$  地震前震中应力变化; b.1976 年松潘  $M_s7.2$  地震前震中应力变化; c.1990 年共和  $M_s7.0$  地震前震中应力变化; d.2008 年汶川  $M_s8.0$  地震前震中应力变化; e.2013 年芦山  $M_s7.0$  地震前震中应力变化

震源区应力具有卸载作用或影响较小,说明后序一些强震延缓了这几次强震的发生。通过模拟笔者还发现青藏高原东北缘地区背景场应力长期处于持续加载状态,背景场应力增量远远大于地震引起的应力增量。因此讨论上述强震引起震源区应力变化的同时,还要充分考虑背景场等效应力变化情况。除芦山地震外,在背景场和强震共同作用下,上述强震震源区应力都处于长期加载状态。说明强震容易发生在等效应力加载的断层上。另外,上述强震发生前震源区都曾出现过地震引起的应力加载的情况。

**2.3.2 历史地震对 1970 年以来地震的影响** 通过降低震源位置所在断层刚度的方法来模拟强震的发生,用等效应力的变化描述地震发生的过程,地震后与地震前各节点的等效应力差为地震的过程,地震发生的时间顺序按表 1 中的顺序依次类推逐个累加。一次地震发生后会引起区域应力场的调整,因此计算历史地震对 1970 年以来地震的影响时,模拟发生每次地震后,应该统计目标区域的应力变化,1970 年以来在以甘东南地区为中心的青藏高原及邻区发生了 5 次 7 级以上强震,图 6 显示了历史强震引起 1970 年以来震源区的应力场演化过程。从曲线图中可以直观地看出 1927 年古浪 8.0、1933 年叠溪 7.5、

1947 年达日 7.7 级地震对 1973 年炉霍 7.6 级地震影响较小,1955 年康定 7.5 级地震加速触发了 1973 年炉霍 7.6 级地震的发生(图 6a);1955 年康定 7.5、1973 年炉霍 7.6 级地震对 1976 年松潘 7.2 级地震不具有加速触发作用(图 6b);1955 年康定 7.5、1973 年炉霍 7.6、1976 年松潘 7.2 级地震对 1990 年共和 7.0 级地震不具有加速触发作用(图 6c);1973 年炉霍 7.6、1976 年松潘 7.2、1990 年共和 7.0 级地震对 2008 年汶川 8.0 级地震的影响较小(图 6d);2008 年汶川 8.0 级地震延缓了 2013 年芦山 7.0 级地震的发生(图 6e)。

### 3 结论与讨论

利用全球地壳模型参数建立了较为精细的 3D 黏弹性有限元模型,在充分考虑黏弹性松弛及地形差异等因素的前提下,计算了以甘东南地区为中心的青藏高原东北缘地区背景场等效应力,采用降低震源区断层刚度的方法模拟系列 7 级以上强震发生后等效应力的演化过程,以及历史强震对后序地震震源区应力的影响。模拟结果说明强震主要发生在背景场应力和强震引起的等效应力加载的断层上。



用等效应力描述地震序列发生过程的应力场变化,其物理意义是着重分析孕震区应力的积累与释放特征(杨兴悦等,2013b),因此研究等效应力变化要结合背景场应力、地震引起的应力以及地质构造研究结果进行综合研究,以便尝试提供具有力学意义的研究方法,为地震预测研究提供辅助支撑。

在研究地学问题时,除等效应力可以描述地震断层的应力状态外,库仑破裂应力变化也是描述地震断层应力状态的一种方法,可表述断层面的加载、卸载或平衡状态。一般认为应力增大,则断层面处于加载状态,会加速孕震进程;相反则会延缓地震孕育进程(刘方斌等,2013)。用等效应力描述地震断层的应力状态,一些学者取得了许多研究成果(宋惠珍等,1982;陈连旺等,1999;Lu *et al.*,2011;杨树新等,2012)。用库仑破裂应力描述地震断层的应力状态,一些学者也取得了许多研究成果(万永革等,2007;陈连旺等,2008;周仕勇,2008)。本文计算过程中只讨论了地震引起的等效应力变化,在今后的相关研究中作者考虑用等效应力与库仑应力分别计算强震降刚后引起研究区域的应力变化,将二者研究结果进行比较,对研究地震中长期地震预测研究有重要意义,同时也为未来区域强震危险性分析提供更可靠的理论依据。

致谢:本文的主要内容是在广东省地震局做访问学者时完成的,在计算过程中得到了广东省地震局邓志辉研究员和中国地震局地壳应力研究所李玉江助理研究员的指导与帮助;Gabi Laske 等在 crust1.0 网站公开提供了全球地壳模型参数,本文使用了甘肃省地震局张元生研究员整理后的地壳模型参数;湖北省地震局邢乐林助理研究员提供了中国大陆 GPS 观测数据;审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

## References

Chen, L. W., Lu, Y. Z., Zhang, J., et al., 1999. Three Dimensional Tectonic Stress Field in North China. *Acta Seismologica Sinica*, 21(2): 140–149 (in Chinese).

Chen, L. W., Zhan, Z. M., Ye, J. Y., et al., 2011. Numerically Modeling the Influence of Rheological Properties on Tectonic Deformation of Tibet Plateau. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 31(3): 8–14 (in Chinese with English abstract).

Chen, L. W., Zhang, P. Z., Lu, Y. Z., et al., 2008. Numerical Simulation of Loading/Unloading Effect on Coulomb Failure Stress among Strong Earthquakes in Sichuan

Yunnan Area. *Chinese J. Geophys.*, 51(5): 1411–1421 (in Chinese with English abstract).

Dai, H. G., Jia, Y. H., Su, X. Z., et al., 1996. Preliminary Study on the Latest Tectonic Deformations along Northeast Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geomechanics*, 2(4): 15–20 (in Chinese with English abstract).

Deng, Q. D., Cheng, S. P., Ma, J., et al., 2014. Seismic Activities and Earthquake Potential in the Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.*, 57(7): 2025–2042 (in Chinese with English abstract).

Deng, Z. H., Hu, M. Q., Zhou, B., et al., 2011. Preliminary Study on Application of Numerical Simulation Methods to Earthquake Predication Research (II). *Seismology and Geology*, 33(3): 670–683 (in Chinese with English abstract).

Ding, G. Y., 1991. Introduction to Lithospheric Dynamics of China. Seismological Press, Beijing (in Chinese).

Laske, G., Ma, Z. T., Masters, G., et al., 2014. CRUST 1.0: A New Global Crustal Model at 1x1 Degrees. <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>

Guo, S. M., Jiang, Z. S., Zhang, C. L., 2000. Division and Motion Status of Blocks for the Northeastern Tibetan Plateau in Late Quaternary. *Seismology and Geology*, 22(3): 219–231 (in Chinese with English abstract).

Li, D. W., Chen, J. L., Chen, G. F., et al., 2014. Continental Seismotectonic System: Example from Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Areas. *Earth Science*, 39(12): 1763–1775 (in Chinese with English abstract).

Li, Y. H., Cui, D. X., Hao, M., 2015. GPS-Constrained Inversion of Slip Rate on Major Active Faults in the Northeastern Margin of Tibet Plateau. *Earth Science*, 40(10): 1767–1780 (in Chinese with English abstract).

Li, Y. J., Chen, L. W., Lu, Y. Z., et al., 2013. Numerical Simulation on Influences of Wenchuan Earthquake on the Stability of Faults in the Neighborhood. *Earth Science*, 38(2): 398–410 (in Chinese with English abstract).

Li, Y. J., Chen, L. W., Liu, S. F., et al., 2014. Impact of the Lushan Earthquake on the Surrounding Faults: Insights from Numerical Modeling. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(5): 627–634 (in Chinese with English abstract).

Liu, B. C., Cao, J. J., Yuan, D. Y., et al., 2008. Quantitative Data of Active Faults within the Active Tectonic Block in North Qinghai-Tibetan Plateau. *Seismology and Geology*, 30(1): 161–175 (in Chinese with English abstract).

Liu, F. B., Wang, A. G., Ji, Z. B., 2013. Research on Coulomb Stress Change and Its Application in Seismology. *China Earthquake Engineering Journal*, 35(3): 647–655 (in Chinese with English abstract).

- Liu, J., Yi, G. X., Zhang, Z. W., et al., 2013. Introduction to the Lushan, Sichuan  $M7.0$  Earthquake on 20 April 2013. *Chinese J. Geophys.*, 56 (4): 1404–1407 (in Chinese with English abstract).
- Liu, M. J., Li, S. L., Fang, S. M., et al., 2008. Study on Crustal Composition and Geodynamics Using Seismic Velocities in the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.*, 51 (2): 412–430 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y. Z., Yang, S. X., Chen, L. W., et al., 2011. Mechanism of the Spatial Distribution and Migration of the Strong Earthquakes in China Inferred from Numerical Simulation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40 (4): 990–1001. doi:10.1016/j.jseaes.2010.07.008
- Ran, H. L., 2011. Empirical Relations between Earthquake Magnitude and Parameters of Strike-Slip Seismogenic Active Faults Associated with Historical Earthquakes in Western China. *Seismology and Geology*, 33 (3): 577–585 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. L., Cao, J. L., 2008. Effective Viscosity of China Continental Lithosphere. *Earth Science Frontiers*, 15 (3): 82–95 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. L., Zhu, S. B., 2003. Contrast of Rheology in the Crust and Mantle near Moho Revealed by Depth Variation of Earthquake Mechanism in Continental China. *Chinese J. Geophys.*, 46 (3): 359–365 (in Chinese with English abstract).
- Song, H. Z., Gao, W. A., Sun, J. X., et al., 1982. Numerical Analysis of Stress Field of Tangshan Area Applying Three Dimensional Finite Element Method to Compute Focal Stress Field. *Northwestern Seismological Journal*, 4 (3): 50–56 (in Chinese with English abstract).
- Steketee, J. A., 1958. On Volterra's Dislocations in a Semi-Infinite Elastic Medium. *Can. J. Phys.*, 36: 192–205. doi:10.1139/p58-024
- Tang, R. C., Wen, D. H., Deng, T. G., et al., 1976. A Preliminary Study on the Characteristics of the Ground Fractures during the Luhuo  $M = 7.9$  Earthquake, 1973 and the Origin of the Earthquake. *Acta Geophysica Sinica*, 19 (1): 18–27 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. G., Shen, Z. K., Zeng, Y. H., et al., et al., 2007. Evolution of Cumulative Coulomb Failure Stress in Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and Its Effect on Large Earthquake Occurrence. *Acta Seismologica Sinica*, 29 (2): 115–129 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. P., Wang, Q. L., 1999. Dislocation Parameters of Gonghe Earthquake Jointly Inferred by Using Genetic Algorithms and Least Squares Method. *Acta Seismologica Sinica*, 21 (3): 285–290 (in Chinese).
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Ye, J. Q., et al., 2008. The  $M_s 8.0$  Wenchuan Earthquake Surface Rupture and Its Seismogenic Structure. *Seismology and Geology*, 30 (3): 597–629 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q., Dang, Y. M., 2010. A Research about Effective Viscosity of Tibetan Plateau Lithosphere Viscoelastic Ductile Layer Using GPS Velocity Fields. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 39 (5): 497–502 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. X., Lu, Y. Z., Chen, L. W., et al., 2012. The Mechanism of Long-Distance Jumping and the Migration of Main Active Areas for Strong Earthquakes Occurred in the Chinese Continent. *Chinese J. Geophys.*, 55 (1): 105–116 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Y., Chen, L. W., Yang, L. M., et al., 2013a. Numerical Simulation on Strong Earthquake Dynamic Process of Bayan Har Block. *Acta Seismologica Sinica*, 35 (3): 304–314 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Y., Chen, L. W., Yang, L. M., et al., 2013b. Effect on Seismic Situation of Gansu Region from Several Strong Earthquakes around the Bayan Har Block. *Earthquake*, 33 (3): 77–89 (in Chinese with English abstract).
- Zhan, Z. M., Chen, L. W., Lu, Y. Z., 2011. Crustal Dynamic Parameters and 3D Finite Element Model of North China. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 31 (Suppl.): 28–32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. N., Gao, L. S., 1989. Three Dimensional Numerical Simulation of Eastern Asian Stress Field. *Earthquake Research in China*, 5 (4): 24–33 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. Z., Deng, Q. D., Zhang, G. M., et al., 2003. Active Tectonic Blocks and Strong Earthquakes in the Continent of China. *Science in China (Series D)*, 33 (Suppl.): 12–20 (in Chinese).
- Zhang, P. Z., Zhu, S. B., Zhang, Z. Q., et al., 2012. Seismogenic Structure and Rupture Mechanism of the  $M_s 8.0$  Wenchuan Earthquake. *Seismology and Geology*, 34 (4): 566–575 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. M., Shu, P. Y., Diao, G. L., et al., 2001. Study on the P and S Wave Velocity Structure under Tangshan Region with Digital Earthquake Record. *North China Earthquake Sciences*, 19 (1): 10–17 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, S. Y., 2008. Seismicity Simulation in Western Sichuan of China Based on the Fault Interactions and Its Implication on the Estimation of the Regional Earthquake Risk. *Chinese J. Geophys.*, 51 (1): 165–174 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈连旺, 陆远忠, 张杰, 等, 1999. 华北地区三维构造应力场. 地震学报, 21(2): 140-149.
- 陈连旺, 张培震, 陆远忠, 等, 2008. 川滇地区强震序列库仑破裂应力加卸载效应的数值模拟. 地球物理学报, 51(5): 1411-1421.
- 陈连旺, 詹自敏, 叶际阳, 等, 2011. 流变特性对青藏高原构造变形影响的数值模拟. 大地测量与地球动力学, 31(3): 8-14.
- 戴华光, 贾云鸿, 苏向洲, 等, 1996. 青藏高原东北缘最新构造变形的初步研究. 地质力学学报, 2(4): 15-20.
- 邓起东, 程绍平, 马冀, 等, 2014. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势. 地球物理学报, 57(7): 2025-2042.
- 邓志辉, 胡劭乾, 周斌, 等, 2011. 数值模拟方法在地震预测研究中应用的初步探讨(II). 地震地质, 33(3): 670-683.
- 丁国瑜, 1991. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社.
- 虢顺民, 江在森, 张崇立, 2000. 青藏高原东北缘晚第四纪块体划分与运动态势研究. 地震地质, 22(3): 219-231.
- 李德威, 陈继乐, 陈桂凡, 等, 2014. 大陆地震构造系统: 以青藏高原及邻区为例. 地球科学, 39(12): 1763-1775.
- 李煜航, 崔笃信, 郝明, 2015. 利用 GPS 数据反演青藏高原东北缘主要活动断裂滑动速率. 地球科学, 40(10): 1767-1780.
- 李玉江, 陈连旺, 陆远忠, 等, 2013. 汶川地震的发生对周围断层稳定性影响的数值模拟. 地球科学, 38(2): 398-410.
- 李玉江, 陈连旺, 刘少峰, 等, 2014. 芦山地震的发生对周围断层影响的数值模拟. 地球学报, 35(5): 627-634.
- 刘百麓, 曹娟娟, 袁道阳, 等, 2008. 青藏高原北部活动地块内部的活断层定量资料. 地震地质, 30(1): 161-175.
- 刘方斌, 王爱国, 冀战波, 2013. 库仑应力变化及其在地震学中的应用研究进展. 地震工程学报, 35(3): 647-655.
- 刘杰, 易桂喜, 张致伟, 等, 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 M7.0 级地震介绍. 地球物理学报, 45(4): 1404-1407.
- 刘明军, 李松林, 方盛明, 等, 2008. 利用地震波速研究青藏高原东北缘地壳组成及其动力学. 地球物理学报, 51(2): 412-430.
- 冉洪流, 2011. 中国西部走滑型活动断裂的地震破裂参数与震级的经验关系. 地震地质, 33(3): 577-585.
- 石耀霖, 曹建玲, 2008. 中国大陆岩石圈等效黏滞系数的计算和讨论. 地学前缘, 15(3): 82-95.
- 石耀霖, 朱守彪, 2003. 中国大陆震源机制深度变化反映的地壳—地幔流变特征. 地球物理学报, 46(3): 359-365.
- 宋惠珍, 高维安, 孙君秀, 等, 1982. 唐山地震震源应力场的数值模拟研究. 西北地震学报, 4(3): 50-56.
- 唐荣昌, 文德华, 邓天岗, 等, 1976. 1973 年炉霍 7.9 级地震的裂缝特征及地震成因的初步探讨. 地球物理学报, 19(1): 18-27.
- 万永革, 沈正康, 曾跃华, 等, 2007. 青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响. 地震学报, 29(2): 115-129.
- 王文萍, 王庆良, 1999. 用遗传算法和最小二乘联合反演共和地震位错参数. 地震学报, 21(3): 285-290.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等, 2008. 汶川  $M_s$ 8.0 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 30(3): 597-629.
- 杨强, 党亚民, 2010. 利用 GPS 速度场估算青藏高原地壳韧性层等效黏滞系数分布的研究. 测绘学报, 39(5): 497-502.
- 杨树新, 陆远忠, 陈连旺, 等, 2012. 用单元降刚度探索中国大陆强震远距离跳迁及主体活动区域转移. 地球物理学报, 55(1): 105-116.
- 杨兴悦, 陈连旺, 杨立明, 等, 2013a. 巴颜喀拉块体强震动力学过程数值模拟. 地震学报, 35(3): 304-314.
- 杨兴悦, 陈连旺, 杨立明, 等, 2013b. 巴颜喀拉块体周缘几次强震对甘东南地区地震形势的影响. 地震, 2013, 33(3): 77-89.
- 詹自敏, 陈连旺, 陆远忠, 2011. 大华北地壳动力学参数及三维有限元模型的建立. 大地测量与地球动力学, 31(增刊): 29-32.
- 张东宁, 高龙生, 1989. 东亚地区应力场的三维数值模拟. 中国地震, 5(4): 24-33.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学(D辑), 33(增刊): 12-20.
- 张培震, 朱守彪, 张竹琪, 等, 2012. 汶川地震的发震构造与破裂机理. 地震地质, 34(4): 566-575.
- 张学民, 束沛镒, 刁桂苓, 等, 2001. 利用数字地震记录判明唐山震区台下的 P、S 波速结构. 华北地震科学, 19(1): 10-17.
- 周仕勇, 2008. 川西及邻近地区地震活动性模拟和断层间相互作用研究. 地球物理学报, 51(1): 165-174.