

杨兴悦, 陈连旺, 杨立明, 李玉江, 谭佩. 2013. 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.
Yang Xingyue, Chen Lianwang, Yang Liming, Li Yujiang, Tan Pei. 2013. Numerical simulation on strong earthquake dynamic process of Bayan Har block. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3): 304—314.

巴颜喀拉块体强震动力学过程数值模拟^{*}

杨兴悦^{1,3)} 陈连旺^{2),*} 杨立明¹⁾ 李玉江²⁾ 谭 佩²⁾

1) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

2) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所(地壳动力学重点实验室)

3) 中国甘肃天水 741020 甘肃省地震局天水中心地震台

摘要 以青藏高原为目标采用弹性体本构关系, 模拟印度板块持续向北推进、挤压对巴颜喀拉块体及邻区的影响. 通过降低强震发生位置处单元弹性模量的方法, 模拟 1900 年以来发生在巴颜喀拉块体及周缘 $M_s \geq 7.0$ 强震, 计算序列中前面地震对后续强震的影响. 模拟结果表明: ① 巴颜喀拉块体背景场应力水平大致与块体西部等效应力同等大小, 自西向东逐渐递减, 巴颜喀拉块体西部和中部等效应力从南向北逐渐递减, 东部地区等效应力比较低; ② 模拟的 14 次地震序列中, 有 8 次发生在前面强震所引起的等效应力增大的区域内, 2 次发生在等效应力增大和减小的过渡区域内, 3 次发生在等效应力减小的区域内; ③ 从强震序列所引起的应力相互作用看, 历史地震对 1970 年以来发生的地震影响结果为: 历史地震加速了 1973 年亦基台错、1997 年玛尼和 2001 年昆仑山口西地震的发生, 昆仑山口西地震对汶川地震的影响较小, 汶川地震对玉树地震的发生不具有加速触发作用.

关键词 青藏高原 巴颜喀拉块体 壳单元有限元模型 数值模拟

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.03.003 中图分类号: P315.8 文献标志码: A

Numerical simulation on strong earthquake dynamic process of Bayan Har block

Yang Xingyue^{1,3)} Chen Lianwang^{2),*} Yang Liming¹⁾ Li Yujiang²⁾ Tan Pei²⁾

1) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

2) Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

3) Tianshui Center Seismic Station, Earthquake Administration of Gansu Province, Tianshui 741020, China

Abstract: In this paper, we used the elastic constitutive relation to simulate the effect induced from the Indian plate everlasting northward collision on the Bayan Har block and surroundings on the Qinghai-Tibet plateau. By reducing the element elastic modulus at the earthquake location, a number of numerical simulations have been made for the strong earthquakes ($M_s \geq 7.0$) since 1900, and also for the influence from the former earthquake on the latter. We obtained the following results: ① The background stress is higher in the west as expressed

^{*} 基金项目 “十一五”国家科技支撑计划子专题“中国大陆强震非稳态活动特征及预测方法研究”(2006BAC01B03-04-05), 甘肃省地震局、中国地震局兰州地震研究所地震科技基金项目(2013M03)联合资助.

收稿日期 2012-02-21 收到初稿, 2012-05-17 决定采用修改稿.

^{*} 通讯作者 e-mail: chenlianwang@yahoo.com.cn

in equivalent stress, and decreases gradually to the east; in the middle-west of the block the stress level decreases gradually from south to north with equivalent stress obviously low in the east. ② In the strong earthquake series eight earthquakes were triggered before their occurrence and three were delayed, while other two were in the stress transition zone. ③ From the stress interaction between the strong earthquakes before and after 1970, we may conclude that the historic earthquakes triggered the 1973 Yijitaicuo earthquake, the 1997 Mani earthquake and the 2001 Kunlun Mountain Pass earthquake, while the influence of Kunlun Mountain Pass quake on the Wenchuan quake is insignificant, and the effect of Wenchuan quake on the Yushu earthquake is unobvious.

Key words: Qinghai-Tibet plateau; Bayan Har block; shell element model; numerical simulation

引言

青藏高原是我国最主要的地震活动区,是我国板内 6 个 I 级活动块体之一,也是我国地震活动最为强烈的块体.该块体内自南向北可分为拉萨、羌塘、川滇、巴颜喀拉、东昆仑—柴达木和祁连山等 6 个 II 级块体.青藏块体地质构造变形复杂,断裂活动强烈,控制着一系列历史强震的发生.1900 年以来在青藏高原中部的巴颜喀拉块体内部及周缘发生了 14 次 7 级以上地震,尤其是近十几年来,接连发生了 1997 年 11 月 8 日西藏玛尼 $M_s7.5$ 地震,2001 年 11 月 14 日青海昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震,2008 年 5 月 12 日四川汶川 $M_s8.0$ 地震,以及 2010 年 4 月 14 日青海玉树 $M_s7.1$ 地震,这一系列 7 级以上强震全部发生在巴颜喀拉块体边界断裂带上.通过计算断层活动所引起的应力变化,研究人员发现,大地震之间是互相影响的(Stein, 2003).而围绕巴颜喀拉块体边界发生的多次强震之间的相互影响和关联则是一个值得深入研究的科学问题,受到许多学者的关注.邓起东等(2010)指出,这一期地震活动与青藏高原中部巴颜喀拉块体的活动密切相关,青藏高原块体活动和地震活动与澳大利亚—印度板块对亚洲大陆的推挤作用相关,青藏高原和巴颜喀拉块体的强震活动与澳大利亚—印度板块边界苏门答腊强震活动相呼应,是未来一定时期内值得关注的主要地震活动区.

一些学者(王连捷等, 2009, 2010; 闻学泽等, 2011; 戴黎明等, 2011; 张晓亮等, 2007)对近年来巴颜喀拉块体周缘发生的 7 级以上强震的发震机理、发震过程及同震形变场进行了数值模拟分析研究.郑勇等(2006)利用有限元方法探讨了欧亚大陆的碰撞对中国大陆岩石圈形变和应力场的影响,并揭示了它们与强震活动性的关系,认为印度板块的碰撞对中国大陆的强震活动性有重要影响.

本文围绕巴颜喀拉块体,建立青藏高原目标区壳体有限元模型.从区域动力学角度着手,使用有限元方法模拟澳大利亚—印度板块的推挤作用对巴颜喀拉块体内及边缘强震形势的影响,并对未来的地震危险区进行初步的探索.

1 青藏高原线弹性壳体有限元模型

1.1 活动断裂

以青藏高原为目标建立了壳单元有限元模型,采用降刚法模拟强震的发生.模型中的

断裂主要是活动块体之间的活动断裂, 包含有喜马拉雅俯冲带、嘉黎断裂带、可可西里断裂带、甘孜玉树—鲜水河—安宁河—则木河—小江断裂带、金沙江断裂带、红河断裂带、龙门山断裂带、阿尔金断裂带、东昆仑断裂带、柴达木盆地北缘断裂带及祁连北缘断裂带等. 在模拟计算中, 把活动断裂处理为一软弱带, 通过物性参数的选取, 降低其刚度, 使其更加容易变形. 在二维有限元模型中为了更好地模拟活动断裂, 以青藏高原块体分界线为目标, 块体内的小断裂忽略处理.

1.2 本构关系

使用壳单元有限元模型, 对复杂的地壳结构进行了简化处理, 采用线弹性本构关系, 应力-应变关系符合胡克定律, 即

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (1)$$

式中, σ_{ij} 为应力分量, D_{ijkl} 是应力应变矩阵, ϵ_{kl} 为应变分量. 对于各向同性材料的广义胡克定律可写为

$$\sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} + \lambda\theta\delta_{ij} \quad (2)$$

式中, λ, μ 为拉梅常数; $\theta = \epsilon_{ii} = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$, $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$.

弹性模量、泊松比等力学参数的关系为

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

式中, E 为杨氏模量, ν 为泊松比.

1.3 几何分区及其物性参数

根据张培震等(2003a)、邓起东等(2010)对活动块体分区的研究结果, 将青藏高原及邻区分为拉萨、羌塘、巴颜喀拉、柴达木、祁连、塔里木、川滇、滇西、华南和鄂尔多斯等构造区域, 在本文中将所有大型断裂均处理为弱化带单元. 关于青藏高原地壳介质参数, 本文主要依据前人的研究成果(李永华等, 2006, 2009; 刘宝峰等, 2003; 苏伟等, 2002; 王椿镛等, 2008; 吴庆举, 曾融生, 1998; 胥颐等, 2009; 张中杰等, 2002), 文中所选的地震震源深度大多数在 15 km 左右, 因此取 15 km 处的波速推算出杨氏模量及泊松比, 按图 1 所示进行分区, 弱化带杨氏模量为两侧分区杨氏模量平均值的 1/3, 弱化带内泊松比比周围区域稍高, 介质物性参数见表 1(弱化带介质参数略).

1.4 网格划分及边界条件

本文用 ANSYS12.1 软件进行数值模拟计算, 整个有限元模型网格共划分为 42531 个单元, 21544 个节点, 单元平均长度约 20 km.

依据板块碰撞及活动块体理论, 模拟印度板块推挤青藏高原, 经过不同的尝试, 在模型中施加了如下边界条件组合: 考虑到印度板块以 N20°E 的运动方向推挤中国大陆(张培震等, 2002), 以及大西洋中脊向东的作用, 对西边界进行法向约束, 切向自由; 北边界 GPS 位移较小, 采用弹簧单元法向约束, 但西段塔里木盆地较为稳定, 西段边界施加的约束强于东段; 同样东边界四川盆地以北受鄂尔多斯的阻挡 GPS 位移很小, 采用弹簧单元法向约束; 四川盆地较为稳定, 边界采用切向与法向全约束; 滇西块体西边界存在 sagging 大

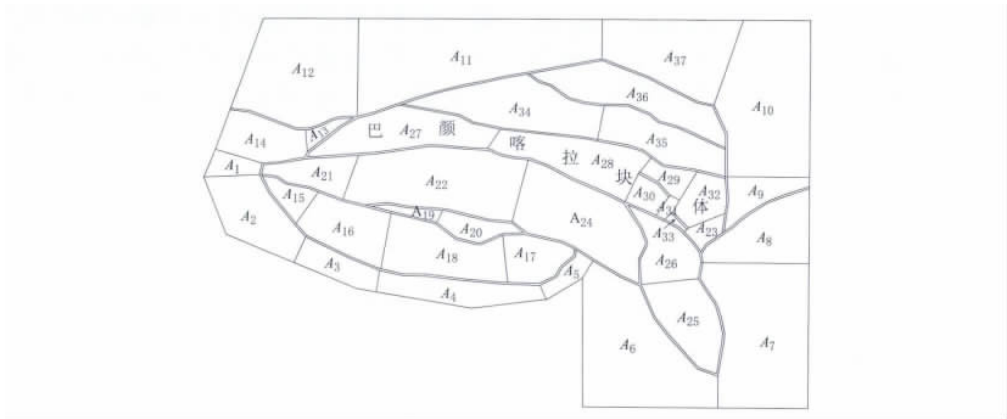


图1 模型分区示意图

Fig.1 Sketch map of the area partition in the model

表1 青藏高原及邻区地壳介质物性参数

Table 1 Crustal physical properties in Qinghai-Xizang plateau and surroundings

分区编号	杨氏模量/ 10^4 MPa	泊松比	分区编号	杨氏模量/ 10^4 MPa	泊松比
A_1, A_2, A_{12}, A_{13}	6.50	0.25	A_3, A_4	8.24	0.25
A_{14}, A_{15}, A_{16}			A_6		
A_5, A_{17}	6.78	0.25	A_8	8.09	0.26
A_7	7.55	0.25	A_{10}	7.23	0.25
A_9	7.59	0.25	A_{18}	5.98	0.27
A_{11}	7.66	0.25	A_{21}, A_{22}	7.50	0.25
A_{19}, A_{20}	6.23	0.26	A_{25}	9.22	0.26
A_{24}	7.32	0.25	A_{27}	5.97	0.25
A_{26}	7.66	0.25	A_{29}, A_{30}, A_{31}	7.47	0.26
A_{28}	6.95	0.25	A_{34}	6.51	0.25
A_{23}, A_{32}, A_{33}	8.51	0.25	A_{36}	8.76	0.25
A_{35}	6.25	0.24	弱化带介质参数为周围块体的 1/3(略)		
A_{37}	6.80	0.28			

型右旋走滑断层，采用法向约束，切向自由；作为印度板块推挤青藏高原绕喜马拉雅构造结物质东流的通道，东边界四川盆地以南和川滇块体南边界不施加特定约束；模型在垂直方向进行约束。经过上述组合约束后，模型的主体区域应力场和位移场与实际基本一致。

前人的研究结果认为印度板块以 50 mm/a 的速度向北东方向推挤(Paul *et al*, 2001; Banerjee, Bürgmann, 2002)，本文中给定一个约 5 万年相对时间尺度，施加到实际模型中换算成力相当于在印度板块俯冲边界段施加 100 MPa 的应力边界条件。以前的相关研究中，有学者也曾选取印度板块的挤压作用强度为 80 MPa 的应力边界条件(张东宁，许忠淮，1999)和大于 100 MPa 的应力边界条件(张东宁，高龙生，1989)；Lu 等(2011)与杨树新等(2012)也在印度边界施加了 100 MPa 的应力。因此，100 MPa 只是一个相对的应力边界条件，在相对应力条件下模拟出的地震之间影响的强度也是相对的。

2 数值模拟结果及分析

2.1 区域水平构造背景应力场模拟结果

在印度板块的推挤作用下，经过多年的变形过程，形成了以羌塘块体东部(玛尼—玉

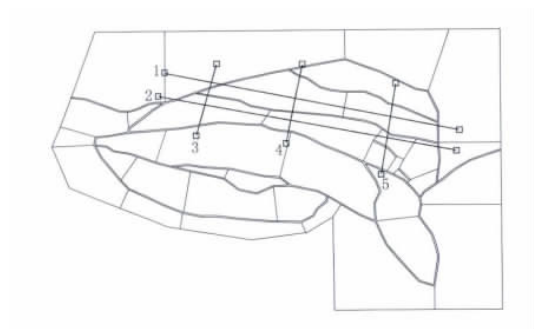


图 2 路径示意图

Fig. 2 Sketch map of the path

式中, σ_1 , σ_2 分别为最大及最小主应力.

等效应力的大小能够反映介质趋于屈服程度的强弱. 等效应力增大, 有利于介质失稳而加速孕震进程; 反之, 则等效应力减小, 不利于介质失稳而减缓孕震进程.

1 号路径位于巴颜喀拉块体北部, 2 号路径位于巴颜喀拉块体内部, 3, 4 和 5 号路径纵跨巴颜喀拉块体, 具体结果见图 3a-e. 图 3 中分别给出了从西向东、从南向北水平构造背景场等效应力沿路径节点的变化过程.

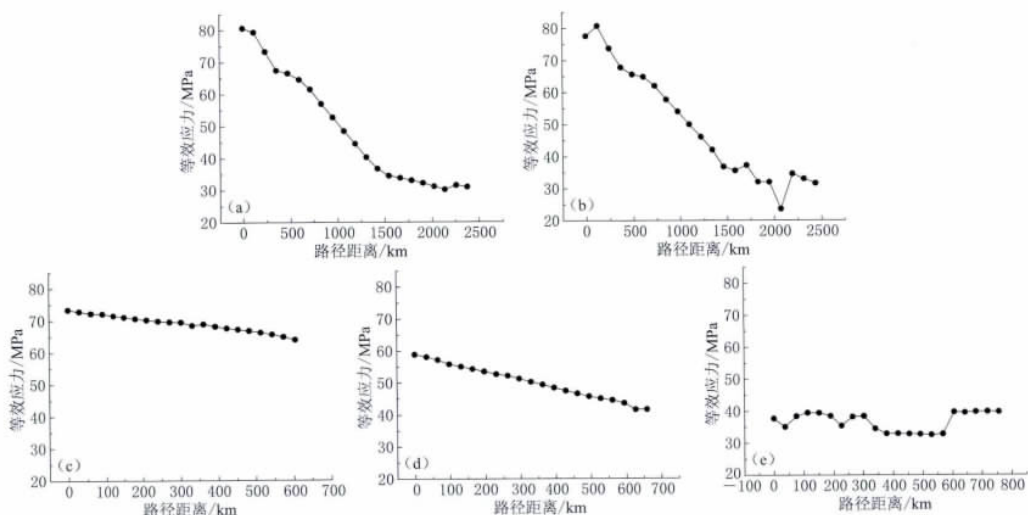


图 3 青藏高原中部等效应力变化曲线

(a) 1 号路径 (b) 2 号路径 (c) 3 号路径 (d) 4 号路径 (e) 5 号路径

Fig. 3 Equivalent stress variation in the middle of Qinghai-Xizang plateau

(a) Path 1; (b) path 2; (c) path 3; (d) path 4; (e) path 5

1 号路径线的模拟结果显示了巴颜喀拉块体的北部等效应力西部地区比东部大, 大致从西向东逐渐递减; 2 号路径线的模拟结果显示了巴颜喀拉块体内部等效应力西部大、东部小, 大致从西向东逐渐递减, 但在块体的东边等效应力呈起伏变化; 3 号与 4 号路径线的模拟结果显示了等效应力从巴颜喀拉块体南向北逐渐递减; 但 4 号比 3 号路径的等效应力低; 5 号路径线的模拟结果显示巴颜喀拉块体的东部等效应力比较低. 图 3 中的单点等效应力变化较大是断层所在的位置.

树—鲜水河断裂南侧)为中心地壳物质向东的流动带, 反映了青藏高原的物质东移(张培震等, 2003b; 陈连旺等, 2010). 本文在青藏高原巴颜喀拉块体及邻区即高原中部, 从西向东横跨大型活动断裂带设计了 5 条路径线(图 2), 分别描述水平构造背景场等效应力沿路径方向的变化特征.

等效应力可定义为

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (5)$$

2.2 强震序列相互作用的模拟结果

以青藏高原及邻区为背景建立壳单元有限元模型，从区域动力学角度着手，模拟澳大利亚—印度板块推挤对我国青藏块体内巴颜喀拉块体及边缘强震形势的影响。杨立明(2009)对青藏高原中强地震动力学过程进行了研究，表明区域强震之间是相互影响相互作用的，一次强震的发生会引起区域应力场的调整，其发生、发展及演变过程蕴含着大震孕育、发展、发生过程的重要信息，具有深刻的动力学内涵。本文主要模拟巴颜喀拉块体内及周缘 1900 年以来发生的 14 次 7 级以上地震。其震源参数见表 2。

表 2 1900 年以来巴颜喀拉块体内及周缘发生的 $M_s \geq 7.0$ 地震目录
Table 2 Earthquake catalogue($M_s \geq 7.0$) in the Bayan Har block and surroundings since 1900

序号	日期 年-月-日	震中位置		M_s	破裂长度/km	水平错动/m	杨氏模量降低百分比	备注
		地点	经度/ $^{\circ}$ E 纬度/ $^{\circ}$ N					
1	1904-08-30	道孚	101.1 31	7.0	67	1.25	15.0%	破裂长度和水平错动数据根据邓起东等(1992)的经验公式得出的；带*的数据直接来源于该文献。
2	1923-03-24	炉霍	101 31.5	7.3	119	1.79	18.0%	
3	1924-07-03	民丰	83.8 36.8	7.3	108	1.69	7.0%	
4	1933-08-25	叠溪	103.4 31.9	7.5	173	2.28	30.0%	
5	1937-01-07	阿兰湖	97.6 35.5	7.5	173	2.28	13.0%	
6	1947-03-17	达日	99.5 33.3	7.7	252	2.91	17.5%	
7	1955-04-14	康定	101.8 30	7.5	173	2.28	25.5%	
8	1963-04-19	阿兰湖	97 35.7	7.0	67	1.25	8.5%	
9	1973-02-06	炉霍	100.7 31.3	7.6	209	2.58	33.0%	
10	1973-07-14	亦基台错	86.5 35.1	7.3	119	1.79	3.5%	
11	1997-11-08	玛尼	87.3 35.2	7.5	173	2.5*	8.0%	
12	2001-11-14	昆仑山口西	90.9 36.4	8.1	420*	6.4*	20.0%	
13	2008-05-12	汶川	103.4 31	8.0	300*	6.0*	37.0%	
14	2010-04-14	玉树	96.6 33.2	7.1	81	1.5*	5.0%	

2.2.1 系列强震引起应力变化模拟结果

Lu 等(2011)以及杨树新等(2012)在模拟过程中通过降低震源所在断层的杨氏模量来模拟震源区部分丧失承载能力引起的应力场的调整变化，本文模拟过程中也使用该方法。对于近年来发生地震的错动距离主要依据相关文献中给出的结果(陈兵等，2003；陈宇坤，陈杰，2004；陈运泰，2008；张桂芳等，2011)，发生较早的地震通过经验公式得到位错，在背景应力场下通过不断尝试使震源处由于降低刚度所产生的位移与地震水平错动距离基本一致。由于区域水平构造应力场大小、方向、各次地震震中区发震断层走向及地震震级大小不一致，上述 14 次地震震源处的弹性模量降低量也为 3.5%—37% 不等。从表 2 中可以看出，降低量最小的为亦基台错地震，最大的为汶川地震。在模拟过程中地震是按发生的时间顺序逐步累加的，用等效应力值的变化来分析地震之间的相互影响。

14 次地震的模拟结果如图 4a—n 所示。图中的等效应力是模拟地震后各节点的等效应力减去背景场的等效应力，即所得到的等效应力为地震所引起的等效应力的变化。从图中可以清楚看出前面地震对后续地震的影响及未来相对危险的区域。

从模拟结果来看，有 8 次地震发生在等效应力增加的区域，分别为 1923 年炉霍 $M_s 7.3$ ，1924 年民丰 $M_s 7.3$ ，1937 年阿兰湖 $M_s 7.5$ ，1955 年康定 $M_s 7.5$ ，1973 年亦基台错 $M_s 7.3$ ，1997 年玛尼 $M_s 7.5$ ，2001 年昆仑山口西 $M_s 8.1$ 和 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震；有 3 次发生在等效应力减小的区域，分别为 1933 年叠溪 $M_s 7.5$ 地震，1973 年炉霍 $M_s 7.6$ 地震

和 2010 年玉树 $M_s 7.1$ 地震; 有 2 次发生在等效应力增减过渡的区域, 分别为 1947 年达日 $M_s 7.7$ 地震和 1963 年阿兰湖 $M_s 7.0$. 周仕勇(2008)通过定量计算断层破裂产生的库仑应力得出断层中发生的强震的相互影响, 加载、卸载和影响很小的情况都存在. 从本文的模拟结果来看这几种情况也都存在, 总体来说后续强震主要发生在前面地震所产生的应力加载区.

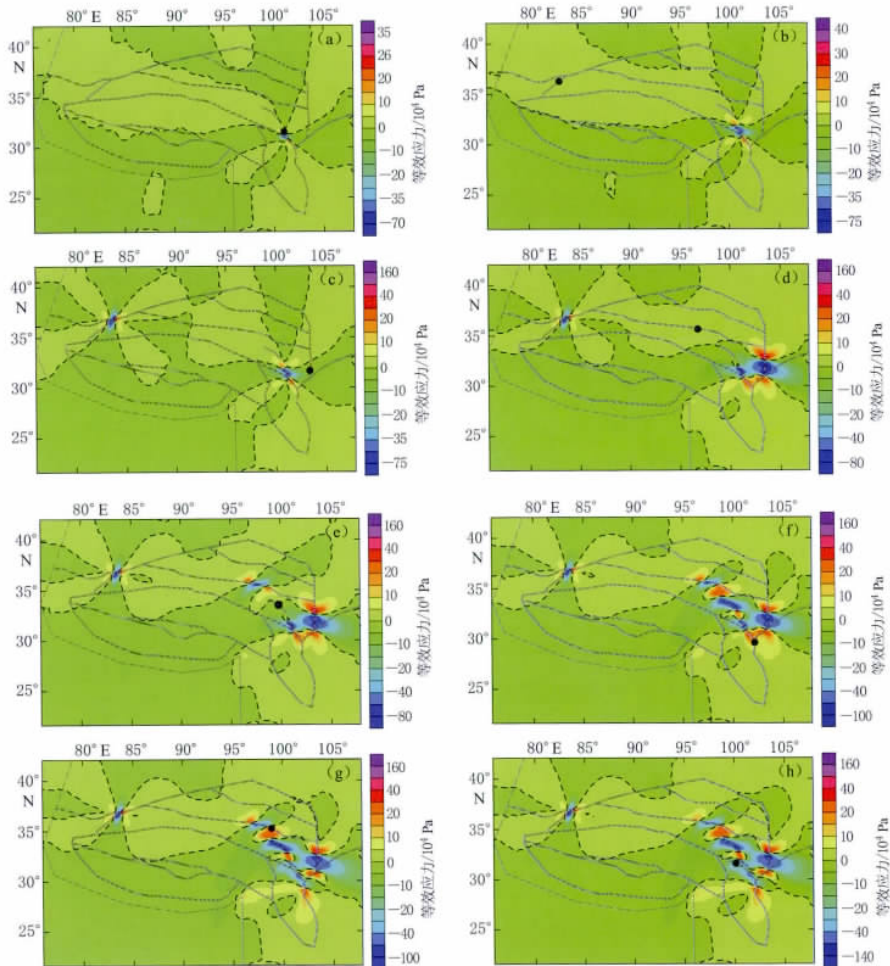


图 4(a)–(h) 地震引起的等效应力变化图

(a) 模拟第 1 次地震(道孚 $M_s 7.0$); (b) 模拟第 2 次地震(炉霍 $M_s 7.3$); (c) 模拟第 3 次地震(民丰 $M_s 7.3$); (d) 模拟第 4 次地震(叠溪 $M_s 7.5$); (e) 模拟第 5 次地震(阿兰湖 $M_s 7.5$); (f) 模拟第 6 次地震(达日 $M_s 7.7$); (g) 模拟第 7 次地震(康定 $M_s 7.5$); (h) 模拟第 8 次地震(阿兰湖 $M_s 7.0$). 图中虚线为 0 Pa 线, 图中黑色圆点表示下一次地震发生的位置

Fig. 4(a)–(h) Equivalent stress variation caused by earthquakes

(a) The first simulated earthquake(Daofu $M_s 7.0$); (b) The second simulated earthquake(Luhuo $M_s 7.3$); (c) The third simulated earthquake(Minfeng $M_s 7.3$); (d) The fourth simulated earthquake(Dixi $M_s 7.5$); (e) The fifth simulated earthquake(Alan Lake $M_s 7.5$); (f) The sixth simulated earthquake(Dari $M_s 7.7$); (g) The seventh simulated earthquake(Kangding $M_s 7.5$); (h) The eighth simulated earthquake(Alan Lake $M_s 7.0$). Dashed lines for 0 Pa and black point stand for the location of next earthquake in the figure

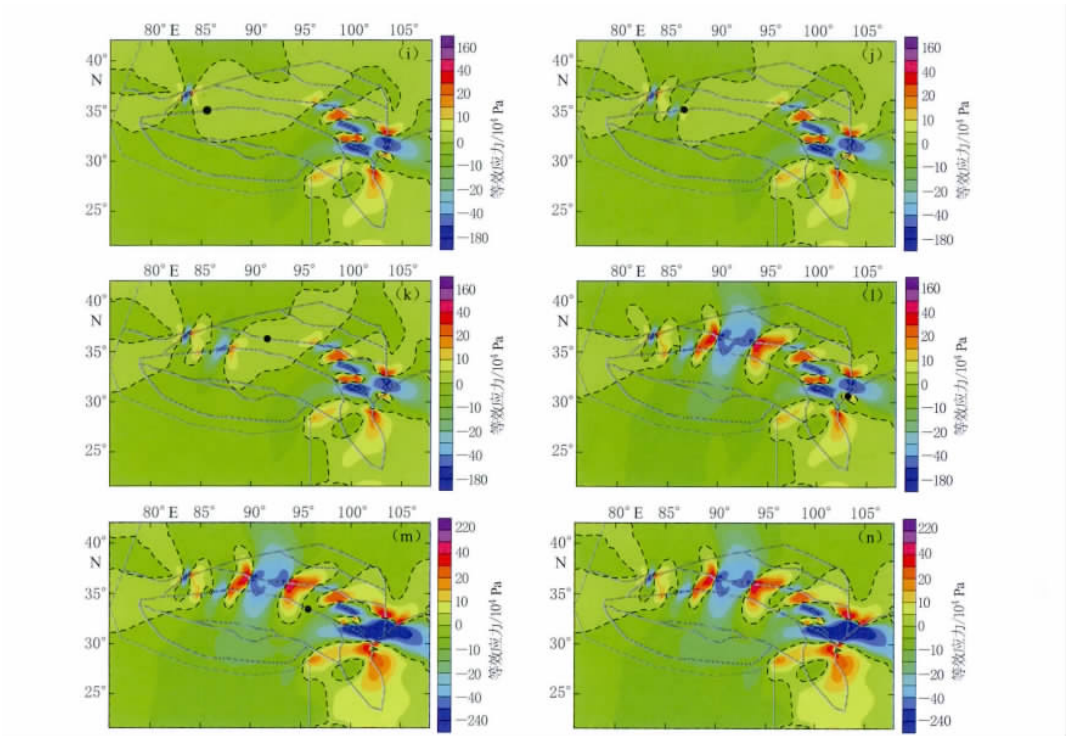


图 4(i)–(n) 地震引起的等效应力变化图

(i) 模拟第 9 次地震(炉霍 $M_s7.6$)；(j) 模拟第 10 次地震(亦基台错 $M_s7.3$)；(k) 模拟第 11 次地震(玛尼 $M_s7.5$)；(l) 模拟第 12 次地震(昆仑山口西 $M_s8.1$)；(m) 模拟第 13 次地震(汶川 $M_s8.0$)；(n) 模拟第 14 次地震(玉树 $M_s7.1$)。图中虚线为 0 Pa 线，黑色圆点表示下一次地震发生的位置

Fig. 4(i)–(n) Equivalent stress variation caused by earthquakes

(i) The ninth simulated earthquake (Luhuo $M_s7.6$)；(j) The tenth simulated earthquake (Yijitaiquo $M_s7.3$)；(k) The eleventh simulated earthquake (Mani $M_s7.5$)；(l) The Twelfth simulated earthquake (Knlun Mountains Pass $M_s8.1$)；(m) The thirteenth imulated earthquake (Wenchuan $M_s8.0$)；(n) The fourteenth simulated earthquake (Yushu $M_s7.1$). Dashed lines for 0 Pa and black point stand for the location of next earthquake in the figure

2.2.2 历史地震对 1970 年后地震的影响

1970 年至目前，巴颜喀拉块体周缘共发生了 6 次 7 级以上地震，分别为 1973 年炉霍 $M_s7.6$ ，1973 年亦基台错 $M_s7.3$ ，1997 年玛尼 $M_s7.5$ ，2001 年昆仑山口西 $M_s8.1$ ，2008 年汶川 $M_s8.0$ 和 2010 年玉树 $M_s7.1$ 地震。从图 5 中可以看出，炉霍地震前震源区由已发生的地震所引起的应力变化一直在下降，1955 年康定 $M_s7.5$ 地震使应力大幅增加，1963 年阿兰湖 $M_s7.0$ 地震对炉霍地震无影响(图 5a)；亦基台错、玛尼、昆仑山口西这 3 次地震前等效应力逐步增大，尤其是亦基台错离玛尼较近，亦基台错地震使玛尼的等效应力突增，也促使了这几次地震提前发生(图 5b, c, d)；叠溪、阿兰湖、达日、康定等地震使汶川震源处的等效应力大幅增加，1973 年炉霍 $M_s7.6$ 地震使其应力水平降低，汶川地震发生前应力水平不是在最大的时段(图 5e)；叠溪、阿兰湖、达日地震使玉树地震震源处的应力水平逐步降低，尤其是 1947 年达日 $M_s7.7$ 地震引起的等效应力减小幅度最大(图 5f)，昆仑山口西、汶川地震的发生也使玉树地震震源处的应力得到了释放，玉树地震是在应力水平降

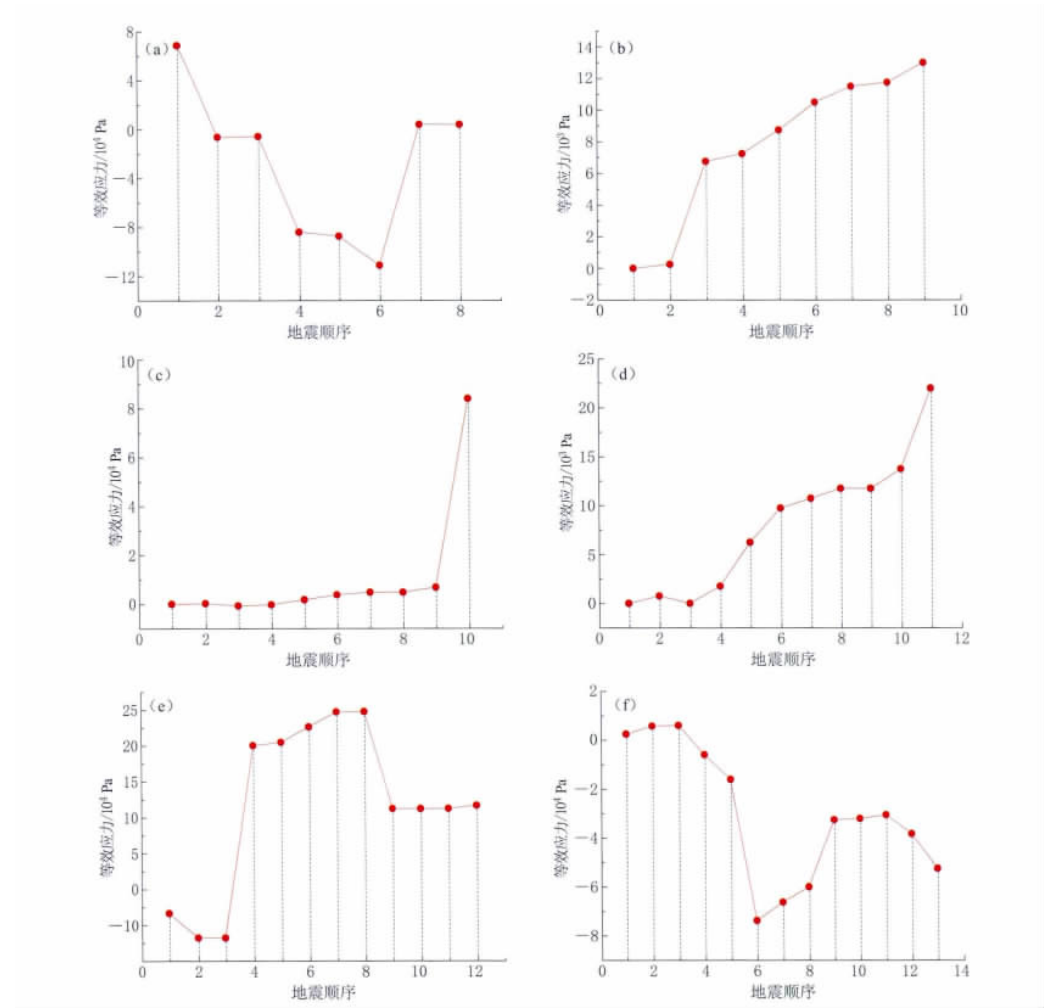


图 5 历史地震(地震顺序见表 2)对 1970 年以来地震的影响

(a) 1973 年炉霍地震前震源处应力变化曲线; (b) 1973 年亦基台错地震前震源处应力变化曲线;
(c) 1997 年玛尼地震前震源处应力变化曲线; (d) 2001 年昆仑山口西地震前震源处应力变化曲线;
(e) 2008 年汶川地震前震源处应力变化曲线; (f) 2010 年玉树地震前震源处应力变化曲线

Fig. 5 Influence of previous earthquakes on the earthquakes since 1970

(a) Stress change in the source region before 1973 Luhuo earthquake; (b) Stress change before 1973 Yijitai earthquake; (c) Stress change before 1997 Mani earthquake; (d) Stress change before 2001 Kunlun Mountain Pass earthquake; (e) Stress change before 2008 Wenchuan earthquake; (f) Stress change before 2010 Yushu earthquake

低过程中发生的,也就是说昆仑山口西、汶川地震的发生可能延缓了玉树地震的发生.

3 讨论与结论

- 1) 本文采用壳单元有限元模型,采用线弹性本构关系,在边界条件约束下,计算出的背景应力场特征大致为:在青藏高原内部从西到东,从南到北等效应力逐渐减小.
- 2) 以青藏高原及邻区为背景建立有限元模型,模拟了青藏高原巴颜喀拉块体内及周

缘强震之间的相互影响.从模拟结果看,14次地震中有8次地震发生在等效应力增加的区域,3次发生在等效应力减小的区域,2次发生在等效应力增减过渡的区域.说明强震之间的相互影响,加载、卸载和影响很小的情况都存在,总体来说强震发生在应力增加区域的次数较多.

3)模拟了历史地震对1970年后地震的影响.结果表明,5次地震发生前震源区等效应力逐渐增大,其中4次震前震源区等效应力持续增加,分别为1973年炉霍 $M_s7.6$,1973年亦基台错 $M_s7.3$,1997年玛尼 $M_s7.5$,2001年昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震,说明这几次地震前发生的强震对本次地震具有触发作用;1次地震(2008年汶川 $M_s8.0$ 地震)震前震源区等效应力略有增加,但变化幅度不大,说明汶川地震前的几次强震对汶川震源区影响较小;1次地震(2010年玉树 $M_s7.1$ 地震)震前震源区等效应力持续降低,也就是说昆仑山口西、汶川等强震可能延缓了玉树地震的发生.

4)本文中使用的是一种简化的模型——线弹性壳体模型,同时未考虑重力、地壳介质的流变性等因素的影响.程佳等(2011)计算了玛尼、昆仑山口西、汶川地震所形成的同震和震后形变场的变化过程与特征,本文结果与他们的同震结果是一致的,但是与黏弹性结果存在差别,显示了开展黏弹性数值模拟研究的重要性.针对这些问题,作者正在开展三维黏弹性有限元的研究工作,以便把本研究推向深入.

5)用等效应力来描述地震序列过程中的应力场变化,其物理意义是着重分析孕震区应力的积累与释放特征.但是,由于不涉及地震类型,这种分析方法存在着一定的局限性.

本文是在中国地震局地壳应力研究所(地壳动力学重点实验室)完成,审稿专家提出了宝贵建议,在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 陈兵,江在森,车时,王庆良,朱桂枝,王继英.2003.玛尼7.9级地震对昆仑山口西8.1级地震的触发作用及动力背景初探[J].中国地震,19(1):1-7.
- 陈连旺,詹自敏,叶际阳,李妍.2010.流变特性对青藏高原构造变形影响的数值模拟[J].大地测量与地球动力学,31(3):8-14.
- 陈宇坤,陈杰.2004.2001年昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震最大位移讨论[J].中国地震,20(4):380-387.
- 陈运泰.2008.汶川特大地震的震级和断层长度[J].科技导报,26(10):26-27.
- 程佳,刘杰,甘卫军,余怀忠.2011.1997年以来巴颜喀拉块体周缘强震之间的黏弹性触发研究[J].地球物理学报,54(8):1997-2010.
- 戴黎明,李三忠,陶春辉,李西双,刘鑫,索艳慧,周淑惠,周永刚,高武斌.2011.印度板块挤压驱动龙门山断裂带活动的三维数值模型[J].地球物理学进展,26(1):41-51.
- 邓起东,高翔,陈桂华,杨虎.2010.青藏高原昆仑—汶川地震系列与巴颜喀喇断块的最新活动[J].地学前缘,17(5):163-178.
- 邓起东,于贵华,叶文华.1992.地震地表破裂参数与震级关系的研究[M]//国家地震局地质研究所.活动断裂研究(2).北京:地震出版社:247-264.
- 李永华,吴庆举,安张辉,田小波,曾融生,张瑞青,李红光.2006.青藏高原东北缘地壳S波速度结构与泊松比及其意义[J].地球物理学报,49(5):1359-1368.
- 李永华,吴庆举,田小华,张瑞青,潘佳铁,曾融生.2009.用接收函数方法研究云南及其邻区地壳上地幔结构[J].地球物理学报,52(1):67-80.
- 刘宝峰,李松林,张先康,张成科,赵金仁,任青芳,海燕.2003.玛沁—靖边剖面S波资料研究与探讨[J].地震学报,

- 25(1): 82–88.
- 苏伟, 彭艳菊, 郑月军, 黄忠贤. 2002. 青藏高原及其邻区地壳上地幔 S 波速度结构[J]. 地球学报, 23(3): 193–200.
- 王椿镛, 楼海, 吕智勇, 吴建平, 常利军, 戴仕贵, 尤惠川, 唐方头. 2008. 青藏高原东部地壳上地幔 S 波速度结构—下地壳流的深部环境[J]. 中国科学: D 辑, 38(1): 22–32.
- 王连捷, 崔明文, 王薇, 乔子江, 孙东生, 赵卫华. 2010. 青海玉树 $M_s7.1$ 地震发震过程的数值模拟[J]. 地质力学学报, 16(2): 137–145.
- 王连捷, 崔明文, 周春景, 孙东生, 王薇, 唐哲民, 钱华山. 2009. 汶川 5·12 地震发震机理的数值模拟[J]. 地质力学学报, 15(2): 105–113.
- 闻学泽, 杜方, 张培震, 龙锋. 2011. 巴颜喀拉块体和东边界大地震序列的关联性与 2008 年汶川地震[J]. 地球物理学报, 54(3): 706–716.
- 吴庆举, 曾融生. 1998. 用宽频带远震接收函数研究青藏高原的地壳结构[J]. 地球物理学报, 41(5): 669–679.
- 胥颐, 黄润秋, 李志伟, 徐亚, 刘劲松, 刘建华. 2009. 龙门山构造带及汶川震源区的 S 波速度结构[J]. 地球物理学报, 52(2): 329–338.
- 杨立明. 2009. 汶川地震发生的动力学过程及中强地震大尺度有序图像演化研究[J]. 国际地震动态, (4): 14–15.
- 杨树新, 陆远忠, 陈连旺, 叶际阳, 米琦. 2012. 用单元降刚度法探索中国大陆强震远距离跳迁及主体活动区域转移[J]. 地球物理学报, 55(1): 105–116.
- 张东宁, 许忠淮. 1999. 中国大陆岩石层动力学数值模型的边界条件[J]. 地震学报, 21(2): 133–139.
- 张东宁, 高龙生. 1989. 东亚地区应力场的三维数值模拟[J]. 中国地震, 5(4): 24–33.
- 张桂芳, 屈春燕, 单新建, 刘云华, 宋小刚. 2011. 2010 年青海玉树 $M_s7.1$ 级地震地表破裂带和形变特征分析[J]. 地球物理学报, 54(1): 121–127.
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块[J]. 地学前缘, 9(2): 430–441.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003a. 中国大陆的强震活动与活动块体[J]. 中国科学: D 辑, 33(增刊): 12–20.
- 张培震, 王敏, 甘卫军, 邓起东. 2003b. 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[J]. 地学前缘, 10(特刊): 81–92.
- 张晓亮, 江在森, 张希, 赵永年, 朱桂芝. 2007. 昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震同震形变场的模拟分析[J]. 大地测量与地球动力学, 27(2): 16–21.
- 张中杰, 滕吉文, 李英康, Klemperer S, 杨立强. 2002. 藏南地壳速度结构与地壳物质东西向“逃逸”: 以佩枯错—普莫雍错宽角反射剖面为例[J]. 中国科学: D 辑, 32(10): 793–798.
- 郑勇, 傅容珊, 熊熊. 2006. 中国大陆及周边地区现代岩石圈演化动力学模型[J]. 地球物理学报, 49(2): 415–427.
- 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[J]. 地球物理学报, 51(1): 166–174.
- Banerjee P, Bürgmann R. 2002. Convergence across the northwest Himalaya from GPS measurement[J]. *Geophys Res Lett*, 29(13): 30–1–30–4.
- Lu Y Z, Yang S X, Chen L W, Lei J S. 2011. Mechanism of the spatial distribution and migration of the strong earthquakes in China inferred from numerical simulation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4): 990–1001.
- Paul J, Gaur V K, Bilham R, Larson K M, Ananda M B, Jade S, Mukal M, Anupama T S, Satyal G, Kumar D, Bürgmann R. 2001. The motion and active deformation of India[J]. *Geophys Res Lett*, 28(4): 647–650.
- Stein R S. 2003. Earthquake Conversations[J]. *Scientific American*, 288(1): 72–79.

作者简介



工作。甘肃省地震学会会员。

杨兴悦 甘肃省地震局工程师。2012年中国地震局兰州地震研究所固体地球物理专业毕业,获理学硕士学位。曾从事台站地震监测和青藏高原强震数值模拟方面的研究。现从事地震监测预测研究方面的工作。甘肃省地震学会会员。



理论及其应用研究。

钱小仕 防灾科技学院讲师。2003年淮北煤炭师范学院数学系数学与应用数学专业毕业,获理学学士学位;2009年南京师范大学数学科学学院概率论与数理统计专业毕业,获理学硕士学位。现从事极值



方 炜 陕西省地震局高级工程师。2002年兰州地震研究所固体地球物理专业毕业,获理学硕士学位。主要从事地球内部结构、地震预测与地震电磁学方面的研究工作。中国地球物理学会会员。



会会员。

谢俊举 中国地震局地球物理研究所副研究员。2010年中国地震局地球物理研究所毕业,获理学博士学位。主要从事强震地面运动、近断层地震动对结构的影响以及近场强震动模拟研究。中国地震学



事数字地震学和综合预报方法的研究工作。

唐兰兰 新疆维吾尔自治区地震局工程师。2003年新疆大学建筑工程学院测绘专业毕业,获工学学士学位;2007年新疆大学资源与环境工程学院地球探测与信息技术专业毕业,获工学硕士学位。主要从事



李 琳 哈尔滨学院工学院土木系讲师。中国地震局工程力学研究所读博士研究生。2007年沈阳建筑大学土木学院固体力学专业毕业,获工学硕士学位。现主要从事地震地面运动记录的工程选取工作。