

云南地区构造应力场与强震活动关系研究*

李玉江¹⁾ 陈连旺¹⁾ 李红²⁾ 叶际阳¹⁾

(¹⁾中国地震局地壳应力研究所,北京 100085)

(²⁾北京市地震局,北京 100080)

摘要 综合考虑云南地区三维波速结构、活动地块构造、地震活动性等多种因素,建立研究区的三维有限元模型。利用GPS观测资料确定有限元模型的边界条件,模拟了云南地区构造应力场的分布状态。结合云南地区近百年来发生的6级以上强震,探讨该地区构造应力场与强震分布的关系。对比分析表明,区域构造应力场的过渡区与已发强震具有较好的对应性,并指出了值得注意的3个潜在地震危险区。

关键词 云南地区;构造应力场;最大剪应力;强震活动;地震危险区

中图分类号:O242.1;P315.72+7

文献标识码:A

RESEARCH ON RELATIONSHIP BETWEEN TECTONIC STRESS FIELD AND STRONG SEISMIC ACTIVITY IN YUNNAN AREA

Li Yujiang¹⁾, Chen Lianwang¹⁾, Li Hong²⁾ and Ye Jiyang¹⁾

(¹⁾ *Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085*)

(²⁾ *Earthquake Administration of Beijing Municipality, Beijing 100080*)

Abstract On the basis of the 3D velocity structure, the active tectonic blocks, the seismic activity, etc. in Yunnan area, a 3D finite element model is established. By determining the model's boundary conditions based on the GPS data, the tectonic stress field in Yunnan area is simulated numerically. Through comparing the tectonic stress field with the $M \geq 6$ earthquake distribution in recent one hundred years, it is found that the stress transitional sections correspond well with the occurred strong earthquake and three potential seismic risk regions are given.

Key words: Yunnan area; tectonic stress field; the maximum shear stress; strong seismic activity; seismic risk region

1 引言

云南地区地处青藏高原东南边缘、南北地震带的南段,是印度板块与欧亚板块碰撞的强烈变形地带,地质构造错综复杂,活动断裂异常发育,地震活动频度高、强度大,是我国最活跃的地震构造区和强震重点监视区之一。近30年来云南地区经历了两个强震活跃时期,期间发生了通海7.7级、大关7.1

级、龙陵7.3级、澜沧7.4级、孟连7.3级和丽江7.0级强震,以及更多的6级地震。因此,在本区开展了较为深入的地球物理、地震地质和大地测量、数值模拟等研究工作,取得了许多研究成果^[1-9]。

本文将在前人研究的基础上,综合考虑云南地区三维波速结构、活动地块构造、地震活动性等多种因素,建立该区三维有限元模型。利用GPS观测资料,确定有限元模型的边界条件,数值模拟云南地区

* 收稿日期:2008-12-19

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2007-6);国家科技支撑项目(2006BAC13B01-0303)

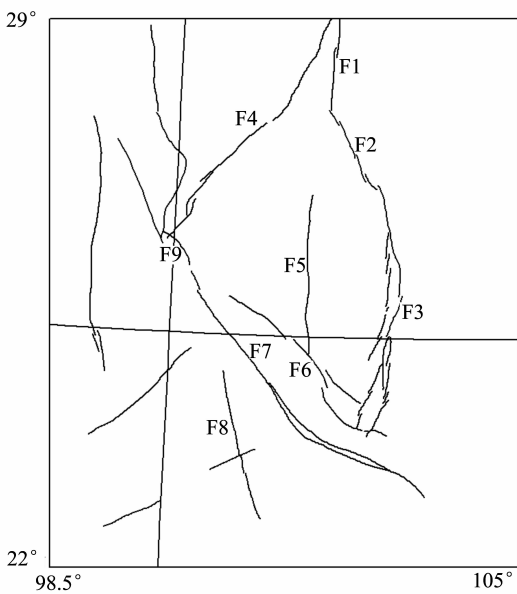
作者简介:李玉江,男,1982年生,硕士,主要从事构造应力应变场的数值模拟工作. E-mail: honylee@yahoo.com.cn

的构造应力场,并探讨区域构造应力场与强震活动的关系。

2 有限元模型及基本参数

2.1 有限单元模型框架

根据云南地区的全新世活动断裂、地壳上地幔三维波速结构等资料,结合震源机制解和 GPS 测量资料,确定模型几何边界条件,建立云南地区三维地质构造模型。在此基础上,考虑到有限元模型的边界效应,必须使有限元模型的边界与云南地区保持一定的距离,最终确定的云南地区有限元模型的边界如图 1。



F1 安宁河断裂带;F2 则木河断裂带;F3 小江断裂带;F4 丽江-小金河断裂带;F5 元谋-绿汁江断裂带;F6 南华-楚雄-建水断裂带;F7 红河断裂带;F8 镇沅-普洱断裂带;F9 维西-巍山断裂

图1 研究区地质构造略图

Fig.1 Sketch of geological tectonics of studied area

表1 研究区主要活动断裂及其几何参数①

Tab.1 Geometric parameters of main active faults in studied area①

断裂名称	走向	倾向	倾角(°)	性质
安宁河断裂带	NS	E/W	陡	左旋走滑
则木河断裂带	NW	NE	60~70	左旋逆走滑
小江断裂带	NS	NE	陡	左旋走滑
丽江-小金河断裂带	NE	SE/NW	陡	左旋正断
元谋-绿汁江断裂带	NS	N	70~80	左旋逆走滑
南华-楚雄-建水断裂带	NW/NWW	NE/SW	陡	右旋逆走滑
红河断裂带	NW	SW/NE	60~85	右旋正断
镇沅-普洱断裂带	NW	NE	陡	右旋走滑
维西-巍山断裂	NW	NE	陡	正右旋

模型中选取的主要活动断裂带及其几何参数见图 1 和表 1。

2.2 介质参数的确定

根据王椿镛等的研究成果^[10]与数值模拟计算的需要,基于纵向分层、横向分区的原则,将模型在纵向上分为 3 层,分别对应上地壳(0~15 km)、中地壳(15~30 km)和下地壳(30~50 km),横向共分为 21 个区。各个分区的物性参数主要根据该地区地壳波速结构的研究成果导出(表 2)。

表2 模型介质分区及其参数

Tab.2 Partitioned media and their parameters of the model

名称	介质分区	杨氏模量 (10 ⁴ MPa)	泊松比 ν	摩擦系数 μ
上地壳	1	8.3	0.25	-
	2	7.7	0.25	-
	3	7.2	0.25	-
	4	6.5	0.25	-
中地壳	13	2.3	0.26	0.65
	14	2.5	0.26	0.65
	15	2.66	0.26	0.65
	5	7.9	0.25	-
	6	8.5	0.25	-
	7	9.3	0.25	-
	8	9.9	0.25	-
	16	2.7	0.26	0.65
	17	2.9	0.26	0.65
	18	3.15	0.26	0.65
下地壳	9	13.3	0.28	-
	10	12.6	0.28	-
	11	11.3	0.28	-
	12	11.9	0.28	-
	19	3.8	0.28	0.65
	20	4.1	0.28	0.65
	21	4.3	0.28	0.65

2.3 网格划分

在地质模型的基础上,建立研究区地壳(包含活动断裂)三维有限元模型。在模型中,各条活动断裂均采用接触摩擦分析理论进行处理。网格的划分,充分考虑该地区活动断裂的展布形态和强震序列的空间分布,因此,断裂带及其邻区网格相对较密。在上述原则的指导下,整个三维有限元模型共划分为 197 901 个单元,65 514 个节点(图 2)。

2.4 模型边界条件的确定

根据文献[7-9,11]给出的 GPS 观测结果确定模型的边界条件(表 3)。计算中,假设地壳变形发

① 邓起东中国活动断层资料(MapSIS 数据库)

生在弹性变形范围内,边界速度场不随深度变化,模型底部各节点可以水平自由滑动,垂直方向固定。

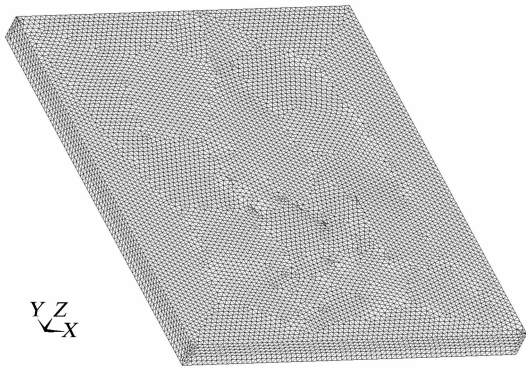


图2 研究区地壳三维有限元模型

Fig. 2 3D finite element model of the crust in studied area

3 云南地区构造应力场的数值模拟

在有限元模型的基础上,考虑千年时间尺度构

造载荷的作用,模拟得到云南地区构造应力场的基本特征。为了反映应力场在纵向上的变化,分别给出了地壳各层应力场分布的等值线图,通过对各层应力场结果进行综合分析,获得研究区应力场的变化特征。综合分析认为:在横向上应力高值区主要集中在断裂带的端点及其交汇区,尤其以交汇区最为显著。在纵向上,同一断裂带随着深度的增加,应力存在增加的趋势。同时,应力值分布具有明显的分区特征,在滇西、滇西南地区应力状态为张性,而其他大部分地区为压性。应力分布在不同的断裂带以及同一断裂带的不同断裂段都存在较大的差异,从而反映了应力积累水平的空间差异。最大主应力反映区域应力场的强度,最大剪应力代表可能导致破裂发生的应力水平。由于云南地区绝大部分地震属于剪切破裂型,因此本研究主要用最大主应力和最大剪应力两个指标来分析应力场的基本特征。

表3 研究区三维有限元模型边界条件

Tab. 3 Boundary conditions of 3D finite element model in studied area

边界	东边界	南边界			西边界			北边界	
		东段	中段	西段	南段	中段	北段	东段	西段
东西向位移(X) (10^{-3} m/a)	6.89	6.28	3.25	-1.17	-2.86	4.25	10.35	7.76	12.37
南北向位移(Y) (10^{-3} m/a)	-3.65	-3.35	-5.54	-3.76	-3.94	-6.28	-9.82	-4.87	-13.88
底部边界约束					$Z=0$				

4 构造应力场与强震活动关系

由于地壳深部背景应力状态确定困难和各种实验及计算的地壳内部应力场之间变化的范围较大,具有一定的不确定性,因此,我们将研究目标集中于本区构造应力场的相对变化上,而不是绝对变化。

选取 1900—2007 年云南地区发生的 6 级以上、震源深度 10 ~ 20 km 的强震^②与模拟计算出的 15km 处构造应力场作为研究对象(图 3、4),探讨强震活动与区域构造应力场的关系。

4.1 最大主应力与强震分布关系

从图 3 可以看出,云南地区的强震活动主要沿断裂带沿线分布,东侧主要分布于安宁河-则木河-小江断裂带,尤以南段的通海地区地震活动频度较高。而西侧红河断裂上,地震活动主要集中于断裂带的北端,即红河断裂与丽江-小金河断裂交汇区。此外,滇西南地区强震活动主要集中于镇沅-普洱断裂南段及一系列北东走向的断裂带上。分析最大主应力分布与强震活动关系,发现强震主要分布在应力等值线的高值区或梯度带上,而 7 级以上地震几乎全部位于应力状态的过渡区(张性-压性)。而红

河断裂的南段虽然处于应力状态的过渡区,且断裂两侧的应力值相对较高,但是本区的强震则较少发生,只是在其北侧的南华-楚雄-建水断裂上存在较

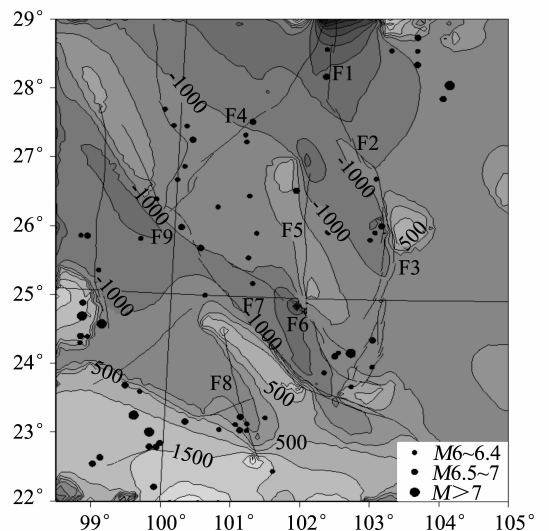


图3 最大主应力与强震分布关系(单位: 10^3 Pa)

Fig. 3 Relationship between the maximum stress and distribution of strong earthquakes (unit: 10^3 Pa)

② 地震目录来自沙海军副研究员

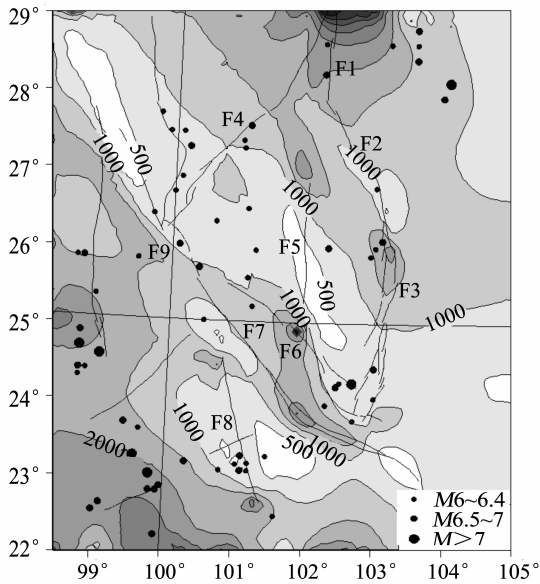


图4 最大剪应力与强震分布关系(单位: 10^3 Pa)

Fig. 4 Relationship between the maximum shear stress and distribution of strong earthquakes (unit: 10^3 Pa)

强的地震活动,具体原因值得进一步研究。

4.2 最大剪应力与强震分布关系

断层错动除与最大主压应力值的大小有关外,更主要的是与最大剪应力的大小有关。

图4较好地反映了最大剪应力与强震的分布关系。从图4可以看出,受断裂带及介质不均匀分布的影响,最大剪应力分布具有明显的不均匀性,研究区主要存在4个剪应力相对高值区:滇西、滇西南、滇东北、红河断裂南段。在前3个区域,强震活动主要集中在最大剪应力高值区或剪应力梯度带上,如2008年8月30日攀枝花的 $M6.1$ 地震就处于最大剪应力梯度带上。红河断裂南段,最大剪应力也相对较高,但强震活动却较弱,纵观历史地震目录,该段仅发生1929年 $M5.5$ 、1972年 $M5.6$ 两次地震,而位于其北侧的通海地区地震活动则相对较强。另外,安宁河断裂南段的西昌与则木河断裂的巧家一带,最大剪应力水平也相对较高,历史上该区曾发生过1489年 $M6.75$ 、1536年 $M7.5$ 、1732年 $M6.75$ 、1850年 $M7.5$ 等6级以上强震,但该区近百年来未发生6级以上强震,仅在1952年发生西昌 $M5.0$ 地震。元谋-绿汁江断裂与南华-楚雄-建水断裂带的交汇区域,最大剪应力水平也相对较高,但是地震却较少发生,这些地区都是值得我们今后重点关注的地区。

综合云南地区最大主应力、最大剪应力与强震活动分布关系,可以看出:地震活动水平的空间差异与区域构造应力场分布有着密切的关系,地震活动

主要发生在应力场高值区或梯度带上。滇西、滇西南、滇东北3个区域构造应力水平相对较高,近100年来云南地区强震活动的空间分布及活动水平差异也较好地反映了区域应力状态的这种差异。分析构造应力场特征与已发强震的关系,我们认为,安宁河断裂南段的西昌与则木河断裂的巧家一带、元谋-绿汁江断裂与南华-楚雄-建水断裂带的交汇区域、红河断裂南段3个区域是值得我们重点关注的地区。

5 结论

依据研究区三维波速结构资料、活动地块构造、地震活动性等多种因素,充分考虑地壳介质的横、纵向非均匀性,基于纵向分层、横向分区的原则,建立了云南地区的三维有限元模型。整个模型共包括30条断裂段、21个地壳介质分区,划分为197 901个单元,65 514个节点。包含了云南地区的主要活动断裂带,基本体现了该区活动地块构造特征。

依据最新GPS观测资料,确定模型的边界条件。利用有限元数值模拟方法,获得了云南地区构造应力场的基本特征。结合该地区近百年来发生的6级以上强震,探讨该地区构造应力场与强震分布的关系。对比分析表明,区域构造应力场的高值区或过渡区与已发强震具有较好的对应性。结合区域构造应力场水平与已发地震情况,我们给出了值得关注的3个潜在地震危险区:安宁河断裂带南段的西昌与则木河断裂带的巧家一带、元谋-绿汁江断裂带与南华-楚雄-建水断裂带的交汇区域、红河断裂南段。

需要指出,模拟结果显示,利用有限元方法模拟云南地区构造应力场的变化,在总体特征上结果比较好,但是对于某些特殊的局部区域变化(丽江地区、通海地区),模拟结果并不太理想。另外,在模型边界条件的选取过程中如果能够考虑不同深度的变化,结果将会更接近实际情况。对构造应力场的研究结果进行更精细的定量分析也是需要解决的问题。

致谢 衷心感谢江在森研究员、沙海军副研究员、陆远忠研究员的指导与帮助!

参 考 文 献

- 1 杨光宇. 云南地震与应力场的初步研究[J]. 地震学报, 1981, 3(3): 242-250.
- 2 杨光宇. 我国西南及其邻区强震活动与构造应力场的探讨[J]. 地震学报, 1982, 4(2): 182-189.
- 3 申重阳, 等. 云南地区主要断层运动模型的GPS数据反演[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(3): 46-51.