

中央级公益性科研院所基本科研业务专项

川滇地区强震前兆异常 动态过程与预测研究

沙海军 刘耀炜 陈连旺 编著
焦 青 朱守彪 杨多兴

地震出版社

中央级公益性科研院所基本科研业务专项

川滇地区强震前兆 异常动态过程与预测研究

沙海军 刘耀炜 陈连旺 编著
焦 青 朱守彪 杨多兴

地 震 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

川滇地区强震前兆异常动态过程与预测研究/沙海军等编著. —北京:地震出版社, 2010. 4
ISBN 978-7-5028-3675-7

I. ①川… II. ①沙… III. ①大地震—地震前兆—研究—四川省
②大地震—地震前兆—研究—云南省 ③大地震—地震预报—研究—四川省
④大地震—地震预报—研究—云南省 IV. ①P315.7
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 239714 号

地震版 XT200900132

内 容 简 介

本书主要内容为关于川滇地区强震前兆异常动态过程的最新研究成果, 结合川滇地区深、浅部构造的最新研究成果, 提出了川滇地区强震综合预测模型的基本构思。同时汲取了国内外关于川滇地区地震预测研究的新成果和新进展。将多个学科的前兆异常动态过程相结合, 使用统一的动力学模型对各种前兆过程做出解释, 是川滇地区地震预测科学探索的一次有益尝试。本书可供从事地震预测和地壳动力学研究的科研人员和工程技术人员及高等院校地球科学专业的师生阅读参考。

川滇地区强震前兆异常动态过程与预测研究

沙海军 刘耀炜 陈连旺 焦 青 朱守彪 杨多兴 编著

责任编辑: 薛广盈

责任校对: 孙铁磊

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

版 (印) 次: 2010 年 4 月第一版 2010 年 4 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 252 千字

印张: 10

印数: 001 ~ 500

书号: ISBN 978-7-5028-3675-7/P (4295)

定价: 35.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

前 言

地震预报，其主要目标在于减轻地震灾害，特别是减少人员的伤亡。在地震多发的我国，推行以人为本，是一项不可或缺的工作。但目前地震预报水平仍然较低，未能很好实现减轻地震灾害和人员伤亡的作用。究其原因，是由于地震预测科学水平较低，不能提供地震预报风险决策所需的足够依据。

现阶段地震预测的主要方法仍然是经验估计和概率统计方法。经验估计方法主要是通过地震实例来总结前兆观测的异常特征，并以之来预测地震。其更进一步的做法是综合多学科异常信息来做出判断。但多年的实践证明，前兆观测异常复杂多变，震例总结给出的异常特征不具备普适性，而且在一定程度上属于主观性判定，缺乏科学性。地震预测概率统计方法的局限性主要表现在三个方面：第一是统计样本量不足，统计的时间段过短；第二是忽视了破坏性地震的自然概率，可能将正常形态的数据变化归结为异常，造成不合理的虚报；第三是以“小概率事件不会发生”来否定潜在的强震危险性，忽略了“一次事件”这个前提，这两种方法的局限性，大大限制了地震预测的发展。故我们需要创新思维，探索新的更具科学性的地震预测方法。

我国目前已经建立起测震学、地下流体、形变和电磁4大学科的地震前兆观测体系，并建立起各自不同的地震预测方法和预测指标体系。这些工作提升了地震监测能力，在一定程度上规范了地震预测的有关工作程序。但从地震预报的实践来看，实现真正减灾意义的地震预报实例屈指可数。其中存在的问题主要是：①对地震发生机制、地震前兆机理、地壳深部结构和地壳运动规律认识不清，未能建立起地震预测的物理模型；②地震前兆观测数据充斥较多干扰信息，由此带来了地震预测信度较低的后果；③地表观测未必能反映地壳深部的构造变动；④中长期地震预测与短临预报脱节。

强震孕育过程的中长期和短临阶段，地震前兆异常的表现形态各异，是一个发展变化的过程。因此，对强震前兆异常动态过程的认识，在一定程度上有利于将中长期地震预测与短临预测相结合，提高强震预测水平。

川滇地区为我国强震活动最为频繁的地区之一。1900年以来，该地区平均每1年就发生1次6级以上地震，每6年发生1次7级以上地震。近20年来，随着地震科学的发展，针对川滇地区的深、浅部地壳构造及其变动研究陆续开展，积累了丰富的研究成果；同时，前兆观测资料也在不断积累，并经过多次

6~7级乃至8级地震的检验。本项研究以川滇地区为研究区域,通过多学科前兆异常动态过程的总结,力图通过多学科的综合,结合对地震孕育过程的最新认识以及川滇地区深部结构的最新研究成果,提出川滇地区强震的综合预测模型的基本构思,并利用地震实例对模型进行了定性的初步检验。

本书由六章组成:第一章川滇地区构造应力场数值模拟研究;第二章川滇地区地下流体前兆异常动态过程;第三章川滇地区跨断层测量前兆异常动态过程;第四章川滇地区地应变场与汶川大震孕震机理研究;第五章测震学前兆异常动态过程;第六章在前面五章的基础上,结合川滇地区深、浅部构造的最新研究成果,提出川滇地区强震综合预测模型的基本构思。各章编写人员:陈连旺编写第一章;刘耀炜、杨多兴、刘冬英编写第二章;焦青编写第三章;朱守彪编写第四章;沙海军编写第五章及第六章。全书由沙海军统稿,刘耀炜审定。

目 录

第 1 章 川滇地区构造应力场数值模拟研究	1
1.1 引言	1
1.2 川滇地区活动断裂三维非线性有限元接触摩擦模型	2
1.3 川滇地区构造应力场的动力边界条件	5
1.4 川滇地区构造应力场及其年动态演化图像	8
1.5 2007 年宁洱 $M_s6.4$ 地震的强震加载效应分析	11
1.6 2008 年川滇地区地震趋势数值模拟研究	13
1.7 2009 年川滇地区地震趋势数值模拟研究	14
1.8 小结	19
第 2 章 川滇地区地下流体强震前兆动态过程	20
2.1 川滇地区强震地下流体异常阶段性特征统计分析	20
2.2 地下流体前兆异常过程特征分析	21
2.3 强震前异常频次统计分析	41
2.4 强震流体异常的时空演化特征分析	43
2.5 强震预测综合指标分析	52
2.6 孔隙弹性介质三维各向异性流-固耦合初步研究	53
第 3 章 川滇地区跨断层测量异常动态过程	72
3.1 水平剪切活动与垂直活动特征	72
3.2 区域应变积累特征	78
3.3 汶川地震前水平剪切扭动、垂直活动及区域应变积累特征	88
3.4 小结	93
第 4 章 川滇地区地应变场与汶川大震孕震机理研究	94
4.1 引言	94
4.2 GPS 观测结果及地应变场	95
4.4 地震过程的有限单元法模拟	102

4.5	关于今后地震预报研究的初步看法	106
4.6	小结	107
第5章	川滇地区测震学前兆异常动态过程	108
5.1	研究思路和研究方法	108
5.2	川滇地区强震测震学前兆异常动态过程	110
5.3	小结	130
第6章	川滇地区强震前兆综合预测模型	132
6.1	强震前兆综合指标体系	132
6.2	强震前兆综合预测模型	132
6.3	小结	146
参考文献		148

第1章 川滇地区构造应力场数值模拟研究

川滇地区位于南北地震带的南段,是我国强震最活跃的地区之一。同时,该区在我国大陆岩石圈动力学研究中占有重要地位,是地球科学研究的热点区域。本章基于多学科的研究成果,综合考虑川滇地区活动地块构造、活动断裂、三维波速结构、地震活动性等多种因素,建立了川滇地区三维活动断裂非线性有限元模型,并使用数值模拟方法研究了川滇地区构造应力场的演化特征以及地震序列对应力场的扰动作用,进一步探讨应力场时空迁移过程与地震序列时空分布特征的关系以及对川滇地区地震活动趋势的影响。

1.1 引言

川滇地区位于青藏亚板块的东南缘,与华南亚板块和东南亚板块邻接,地质构造活动和45Ma以来印度板块与欧亚板块的强烈碰撞密切相关。许多证据表明,两大板块的碰撞引起了川滇地区强烈的构造活动,且至今仍在继续着(王椿镛等,2002)。该区活动断裂发育,新构造活动十分强烈,其西南部的腾冲地区是我国近代火山活动区之一。

从强震活动角度来看,川滇地区位于中国的南北地震带的南段,是我国最活跃的地震构造区之一,因而也是我国强震活动的重点监视区之一。自20世纪70年代以来,该区相继发生了一系列7级以上强烈地震,如1970年通海7.8级地震、1973年炉霍7.6级地震、1974年昭通7.1级地震、1976年龙陵7.4级地震、1976年松潘7.2级地震、1988年澜沧-耿马7.4级地震、1995年孟连西南7.3级地震、1996年丽江7.0级地震以及2008年汶川8.0级地震等,特别是2008年5月12日在龙门山断裂带上发生的汶川8.0级特大地震,不仅在震中区附近造成灾难性的破坏,而且在四川省和邻近省市造成大范围破坏,其影响更是波及到全国绝大部分地区乃至境外,是新中国建立以来我国大陆发生的破坏性最为严重的地震。

川滇地区在中国大陆岩石圈动力学和运动学的研究中占有非常重要的地位,是地球科学家研究的热点区域。阚荣举等(1977)探讨了西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征,许忠淮等(1987)由多个小震推断了川滇地区地壳应力场的方向特征,谢富仁等(1993,1994)利用活动断层擦痕,结合震源机制解、原地应力测量资料,得出了中国西南地区现代构造应力场的基本特征,崔效锋等(1999,2006)利用震源机制解对中国西南地区的应力分区进行了研究,王绳祖等(2002)讨论了塑性流动网络控制下川滇菱形块体及邻区的构造应力场与地震构造,Royden等(1997)、张培震等(2002)和申重阳等(2002)根据GPS观测资料研究了区域构造变形特征,王椿镛等(2002)研究了地壳上地幔的波速结构,徐锡伟等(2003)探讨了川滇地区活动块体的最新构造变动样式及其动力来源。

基于多学科的研究成果,综合考虑川滇地区活动地块构造、活动断裂、三维波速结构、地震活动性等多种因素,开展了如下研究工作:①建立川滇地区三维活动断裂非线性有限元模型;②分析研究川滇地区的动力边界条件以及喜马拉雅东构造结的控制作用;③数值模拟边界位移速率、下地壳物质流动和主要活动断裂共同作用下的联合微动态应力-应变场图像;④选

择 2000 年至 2006 年 $M_s 6.0$ 以上的强震以及 2007 年以来的 $M_s 4.5$ 地震序列, 研究应力场时空迁移过程与地震序列时空分布特征的关系, 在此基础上, 探讨 2008 年川滇地区地震趋势; ⑤ 2007 年下半年以来的 $M_s 5.0$ 地震序列, 特别是 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 地震, 研究应力场时空迁移过程与地震序列时空分布特征的关系, 分析 2009 年川滇地区地震活动趋势。

1.2 川滇地区活动断裂三维非线性有限元接触摩擦模型

1.2.1 接触摩擦分析单元与活动断裂的处理

在状态非线性问题中, 接触问题是一种非常重要的非线性行为。非连续的地质构造演化过程常常包含了典型的接触摩擦行为。在以往的模拟计算中, 仅把活动断裂处理为一软弱带, 通过物性参数的选取, 降低强度, 使其更加容易变形。如此处理的问题在于: 无法模拟地壳介质中存在的不连续间断面, 无法模拟断层面上存在的摩擦机制。为了在三维有限元模型中更好地模拟活动断裂, 采用接触摩擦分析理论处理活动断裂的动力学和运动学特征, 探索利用接触摩擦分析理论模拟研究活动断裂的方法, 尝试解决有限元分析中如何处理活动断裂这一难点问题, 建立一个更接近实际的活动断裂三维有限元模型。

采用接触摩擦分析理论处理活动断裂的非线性有限元模型则既能够模拟间断面, 也能够模拟断层面上存在的摩擦机制。接触摩擦分析单元把断层模拟为一间断面, 在一个物理断面上, 相对于断层的上下盘建立一对接触面, 接触面之间遵从库仑滑动定律。一旦断层面上剪应力超过极限摩擦应力, 则断层两盘发生相对位错。

1.2.2 三维有限元模型

中国大陆的西南部处于与印度板块强烈碰撞的前沿, 东南部和东部也分别受到菲律宾海板块、太平洋板块俯冲的影响。三大板块的作用, 尤其是印度板块和欧亚板块的强烈碰撞及其之后的印度板块向欧亚板块的挤入作用, 形成了青藏高原的强烈隆升和许多大型活动走滑断裂带。目前仍在持续进行中的板块之间的汇聚作用, 导致青藏高原及其邻区地壳的缩短和青藏高原东部块体的向东挤出。根据川滇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, 特别是对地质构造运动和地震活动起决定作用的活动断裂和活动断块, 建立川滇地区三维非线性有限元模型。在模型中, 采用接触摩擦单元来处理活动断裂。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川滇地区保持一定的距离。最终确定川滇地区地质模型的边界如下: 北部边界位于 34°N 附近; 南部边界位于 20°N ; 西部边界位于 96°E ; 东部边界位于 106°E 附近。

依据徐锡伟等 (2003) 的研究成果, 川滇地区活动断裂三维非线性有限元模型所选取的主要活动断裂带包括: 岷江断裂、马尔康断裂、龙门山断裂、甘孜-玉树断裂、鲜水河断裂、理塘-德巫断裂、金沙江断裂、德钦-中甸-大具断裂、丽江-小金河断裂、鹤庆-洱源断裂、大凉山断裂、安宁河断裂、则木河断裂、小江断裂、楚雄-建水断裂、永胜-宾川断裂、红河断裂带、镇源-普洱断裂、龙陵-瑞丽断裂、腾冲-澜沧断裂带、南宁河西支断裂和孟连-澜沧断裂等。模型所选取的主要活动断裂带见表 1-1。

表 1-1 川滇地区主要活动断裂 (徐锡伟等, 2003)

断层名称	断层长度/km	断层走向	断层性质
岷江断裂	150	NS	左旋逆走滑
马尔康断裂	120	NW	左旋走滑
龙门山断裂	500	NE	逆右旋
甘孜-玉树断裂	500	NW	左旋
鲜水河断裂	430	NW	左旋走滑
理塘-德巫断裂	200	NW	左旋逆走滑
金沙江断裂	700	NS	右旋逆走滑
德钦-中甸-大具断裂	290	NW	右旋正走滑
丽江-小金河断裂	400	NE	左旋正断
鹤庆-洱源断裂	120	NE	右旋正断
大凉山断裂	280	NNW	左旋
小江断裂	400	NS	左旋走滑
则木河断裂	120	NW	左旋逆走滑
永胜-宾川断裂	160	NS	正左旋
南华-楚雄-建水	340	NW	右旋逆走滑
红河断裂	>600	NW	右旋正断
龙陵-瑞丽断裂	>150	NE	正左旋
腾冲-澜沧断裂	380	NW	右旋
南宁河西支断裂	>200	NE	左旋
安宁河断裂	150	NS	左旋
孟连-澜沧断裂	>100	NE	左旋
镇源-普洱断裂	240	NW	右旋

川滇地区的活动断裂带控制了主要构造运动的发生和发展,同时也成为活动地块的边界。徐锡伟等(2003)基于“活动块体”的基本概念,综合地表破裂型历史地震的空间分布、主干活动断裂和次级活动断裂的展布特征,把川滇地区划分为4个一级块体:马尔康块体(I)、川滇菱形块体(II)、保山-普洱块体(III)和密支那-西盟块体(IV)。由于受到次级NE向断裂的切割,川滇菱形块体(II)可进一步划分为川西北(II1)和滇中(II2)2个次级块体;而保山-普洱块体(III)则可细划为保山(III1)、景谷(III2)和勐腊(III3)3个次级块体。

王椿镛等(2002),根据云南和四川地震台网174个台站记录的4625个区域地震初至P

波和 S 波走时数据，并结合其它深部地球物理资料，确定了川滇地区地壳上地幔的三维波速结构（表 1-2）。三维非线性有限元模型的建立以及动力边界条件的确定，应该充分考虑上述地壳上地幔的结构特征，才可能得出比较理想的结果。综合分析这些研究成果，我们确定了川滇地区三维地质模型，根据川滇地区的地质构造和平均波速结构划分为若干个子分区，不同分区的介质参数互不相同。

表 1-2 川滇地区地壳上地幔平均波速结构

深度/km	$V_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_s/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	μ	ρ/kgm^{-3}
10	5.88	3.43	0.25	2685
30	6.45	3.74	0.25	2682
50	7.75	4.35	0.28	2835
85	8.00	4.42	0.28	3270

根据川滇地区的构造特征，划分出 5 个子区（图 1-1）：菱形块体内部（M1）、马尔康地区（M2）、四川盆地（M3）、滇东地区（M4）以及其余地区（M5）。其中川滇块体内部相对较软，四川盆地相对较硬，其它地区介于二者之间。如此得到 5 个介质分区，各个子分区的介质参数见表 1-3。

表 1-3 川滇地区模型介质分区参数

分区	弹性模量/ 10^4MPa	泊松比	断层摩擦系数
1	8.1	0.25	0.6
2	7.9	0.26	
3	7.7	0.26	
4	7.7	0.26	
5	7.5	0.26	

有限元模型水平范围为：（96°~106°E，20°~34°N），垂直区域为：地表至下地壳 40km 深处。活动断裂处理为接触摩擦单元，共选取表 1-1 中的 22 条断裂（图 1-2a）。有限元模型划分的基本原则为：首先必须保证所建模型的解决实际问题的能力，即有限元模型的分辨率或精度必须满足实际问题的需要，这就要求网格划分越精细越好。在此基础上，还需要兼顾解决实际问题所承受的代价，即有限元模型的效率不能太低，一个模拟计算过程不能耗时过长，这又要求网格划分不能过于精细。有限元模型的坐标系为右手直角坐标系 xyz ，其 x 轴正向指向正东， y 轴正向指向正北， z 轴正向向上，坐标原点位于模型底面的西南角点上。

图 1-2b 是地质模型离散化的具体结果，整个有限元数值模型共划分为单元 37233 个，节点 10469 个。

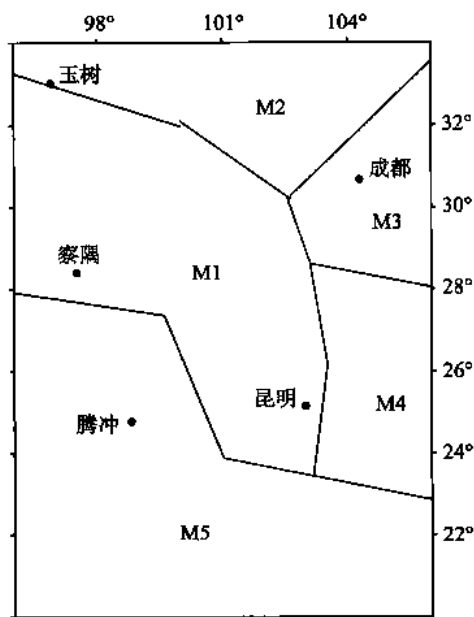


图 1-1 川滇地区模型介质分区图

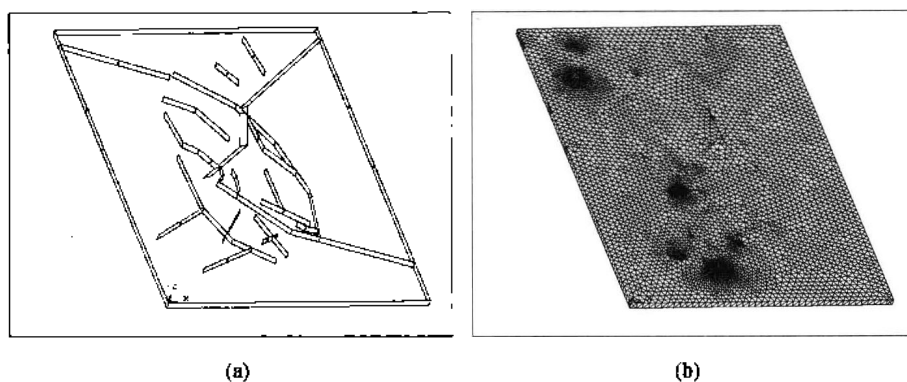


图 1-2 川滇地区活动断裂三维接触摩擦有限元模型
(a) 模拟断裂; (b) 离散化模型

1.3 川滇地区构造应力场的动力边界条件

1.3.1 板块运动和活动块体之间的相互作用

研究表明，中国大陆现代构造应力场主要起源于中国大陆周围板块间的相互作用。印度板块 NNE 向的强烈碰撞作用是大陆构造应力场最主要的动力源，它控制了大陆构造应力场和构造运动的总体特征。对于川滇地区来说，西北部受青藏高原的

隆起及向东的物质挤出作用，西南部受印度板块的挤压作用，东部受到华南块体的阻挡作用，其中，喜马拉雅东构造结的相对固定旋转轴作用和稳定的四川盆地的阻挡作用导致物质东流的方向发生顺时针偏转，从向东转为向东南。地质构造、地震活动和大地测量资料均显示了川滇地区绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转运动（王二七等，2001；Holt *et al*, 1995；张培震等，2002）。

1.3.2 喜马拉雅东构造结的控制作用

有研究表明（张培震等，2002），青藏高原物质向东的挤出或流动在东部边界一带调整为绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转。川滇地区西北边界附近具有较大的近正东向位移，在区域内部，从北往南，位移方向由近 EW 向开始顺时针旋转为 SEE 方向，逐渐转为 SE—SSE 方向，甚至在喜马拉雅东构造结以南的西北边界附近位移方向已经旋转为 SSW 方向，既显示出比较显著的物质东流图像，也具有比较明显的绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转特征。

本文在板块间相互碰撞作用的动力边界条件基础上，以震源机制解资料以及 GPS 观测和地质资料所确定的块体运动方式作为约束条件，经过反复试算，我们发现，在西北部受青藏高原向东的物质挤出作用、西南部受印度板块的挤压作用、东部和北部受到阻挡作用的基本动力背景的基础上，作为川滇地区顺时针转动的相对固定旋转轴的喜马拉雅东构造结起到了重要作用（图1-3）。模拟结果也进一步表明，对于川滇地区构造应力场而言，喜马拉雅东构造结实际上起到了相对固定旋转轴的作用。

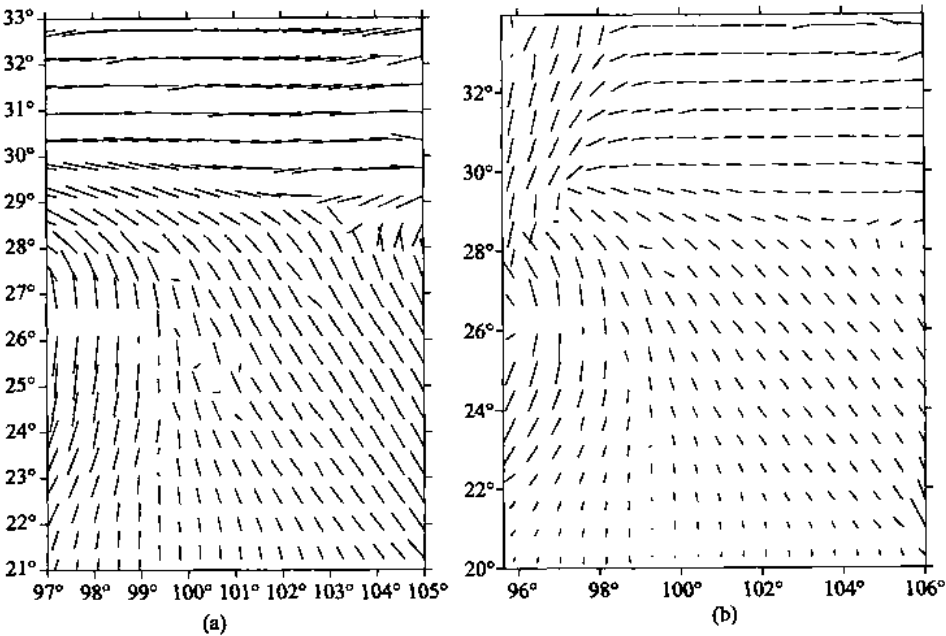


图 1-3 喜马拉雅东构造结的相对固定旋转轴作用对应力场的影响
(a) 作为固定轴；(b) 不作为固定轴

1.3.3 川滇地区构造应力场模型的边界条件

考察以往相关研究成果（崔效锋等，1999，2006；谢富仁等，2003；张东宁等，1995，1999），经过反复试错，最终确定了川滇地区动力边界条件的具体数据（大小与方向）。模型的侧面边界条件见图1-4，其中喜马拉雅东构造结处取为固定轴；模型的底面边界垂直方向固定，水平方向自由。全部边界条件的具体细节见表1-4。

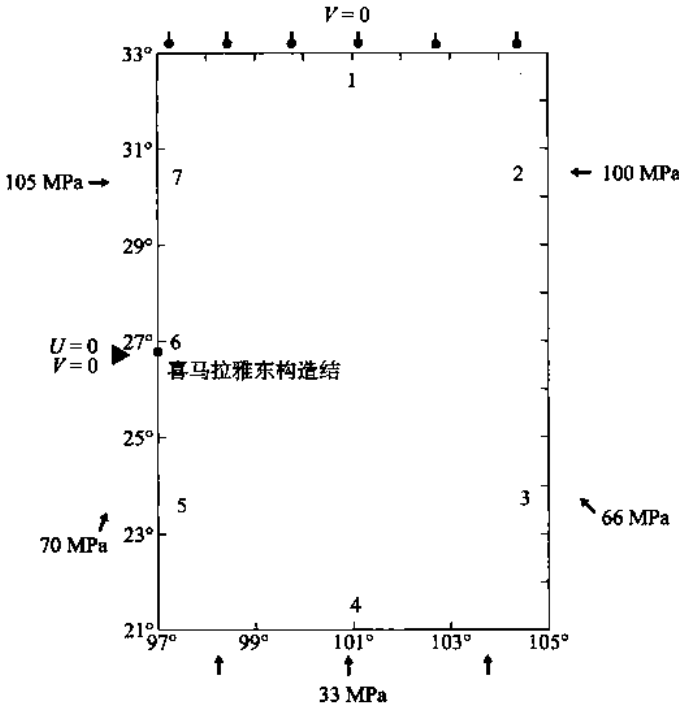


图1-4 川滇地区构造应力场模型边界条件简图

表1-4 川滇地区三维有限元模型边界条件*

边界段 [#]	X方向应力	Y方向应力	Z方向应力	X方向位移	Y方向位移	Z方向位移
1	-	-	-	-	0	-
2	-100MPa	-	-	-	-	-
3	-47MPa	47MPa	-	-	-	-
4	-	33MPa	-	-	-	-
5	24MPa	66MPa	-	-	-	-
6	-	-	-	0	0	-
7	105MPa	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	0

注：* 边界条件的正负由前文定义的坐标系确定。

[#]边界段定义：1 为北部边界；2 为东部边界北段；3 为东部边界南段；4 为南部边界；5 为西部边界南段；6 为喜马拉雅东构造结；7 为西部边界北段；8 为底部边界。

1.4 川滇地区构造应力场及其年动态演化图像

1.4.1 川滇地区背景构造应力场图像特征

利用前文给出的川滇地区三维有限元模型的边界条件（图 1-4 和表 1-4），对于川滇地区构造应力场的背景场进行了数值模拟，具体模拟结果见图 1-5。

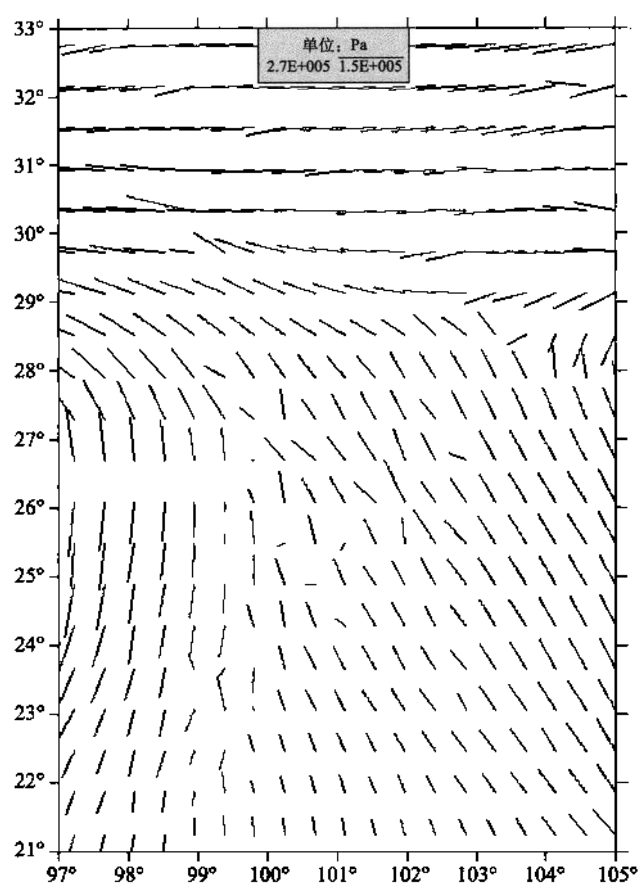


图 1-5 川滇地区构造应力场矢量图

最大主应力方向明显分为三个子区：在 30°N 以北的近 EW 向的压应力区，对应于西侧羌塘块体向东的运动和东侧比较稳定的四川盆地的阻挡作用；在 30°N 以南以及 100°E 以西的区域为 SSW—NNE 的压应力区，产生于印度板块的北东向的挤压作用；在 30°N 以南以及 100°E 以东的区域的 SE—NW 的压应力区，则由于华南块体对于川滇地区内部的 SE 向的物质流动也起到了一定的阻挡作用。

最大主应力的极大值为 155MPa，平均值约为 90MPa 左右。原地应力测量资料表明（谢富仁等，2003），滇西北地区丽江、剑川、下关测点，320 ~ 450m 深度处的地应力测值分别

为 23.4MPa, 22.9MPa 和 30.2MPa。孙叶和谭成轩(1995) 根据全国 2011 个地应力实测数据, 通过归一化处理之后推算了全国各地的线性回归方程, 得到西南地区地应力的回归方程: $\sigma_H = 26.74H + 6.3074$, 拟合系数为 0.9924; $\sigma_V = 17.57H + 0.8558$, 拟合系数为 0.9874。其中 σ_H 和 σ_V 分别为水平最大主应力和垂直主应力, 单位: MPa, H 为深度, 单位: km。据此方程, $H = 10\text{km}$ 处的 $\sigma_H = 280\text{MPa}$, $\sigma_V = 180\text{MPa}$ 。地应力实测值均为全应力, 其中包含了静岩压力, 而构造应力则应为去掉球应力之后的偏应力, 即: $\sigma_H - \sigma_V$, 因此, 西南地区的构造应力大致为 100MPa。我们的模拟结果与实测数据大体一致。

应力状态与断裂带运动方式的关系: ①北部的近 EW 向应力区主要有左旋走滑的鲜水河断裂带、右旋走滑逆冲的龙门山断裂带、逆冲左旋走滑的岷江断裂带以及右旋走滑逆冲的金沙江断裂带, EW 向的主压应力既有利于 NW 走向的鲜水河断裂带与岷江断裂带的左旋走滑作用, 又有利于近 NS 走向的金沙江断裂带的逆倾滑作用, 而且与龙门山断裂带的右旋走滑逆冲作用相一致。鲜水河断裂带与岷江断裂带上地震非常活跃以及 2008 年 5 月 12 日发生的具有右旋走滑 + 逆冲作用的汶川 $M_s 8.0$ 地震就印证了这一点; ②东南部的 NW—SE 向应力分区内存在左旋走滑的安宁河断裂带, 则木河断裂带与小江断裂带以及右旋走滑的红河断裂带, NW—SE 向的主压应力有利于近 NNW—NS 走向的左旋走滑断裂活动; 而走向与主应力方向相近的红河断裂带的右旋走滑活动则可能更多地带有张剪性质, 尽管其活动量不小, 但地震活动的规模和强度均弱于菱形块体东边界的左旋走滑断裂带; ③西南部 NNE—SSW 向的主压应力有利于近 NS 向的右旋走滑断裂以及左旋走滑断裂的活动。

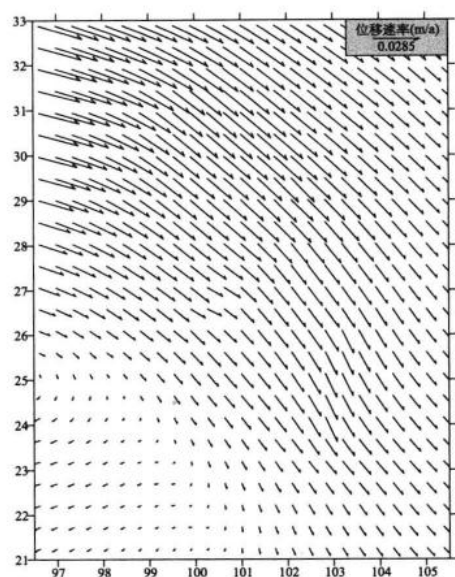
1.4.2 联合微动态应力应变场

一个地区的构造应力应变场由背景场及其变化场构成, 其中变化场主要包括两类: 一类由地震引起的强动态应力应变场, 特点是强度大, 作用时间短, 属于不连续突变构造进程。另一类由边界作用的变化、断裂带的无震滑动所引起的微动态应力应变场, 特点是强度小, 作用时间长, 属于连续渐进构造过程。

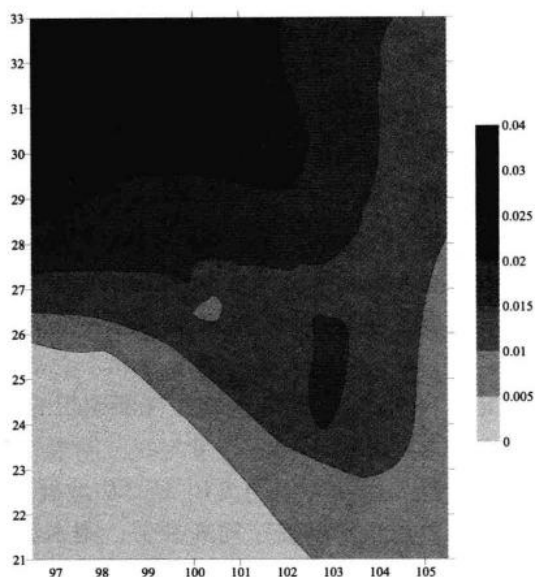
把外边界作用变化和内部主要活动断裂活动引起的应力应变场进行迭加, 得到微动态应力应变场的完整图像 (图 1-6, 图 1-7)。

川滇地区动态形变场的年变化图像 (图 1-6) 特征为: ①与活动断裂、边界位移速率单独引起的位移场比较, 综合考虑两种动力作用的位移场在菱形块体内部的结果更接近于 GPS 实测位移场; ②活动断裂作为主应变集中带的特征更加显著, 几乎所有的断裂带均清晰地显示出来; ③应变能密度不仅在断裂带的交汇处、断裂带两端集中, 而且充分显示出沿整个断裂带集中的图像。比较而言, 鲜水河断裂带、小江断裂带、丽江-小金河断裂带以及腾冲地区应变能密度高于其它地区; ④西南部地区、滇中块体部分地区以及马尔康块体的炉霍地区处于张应变区之中。

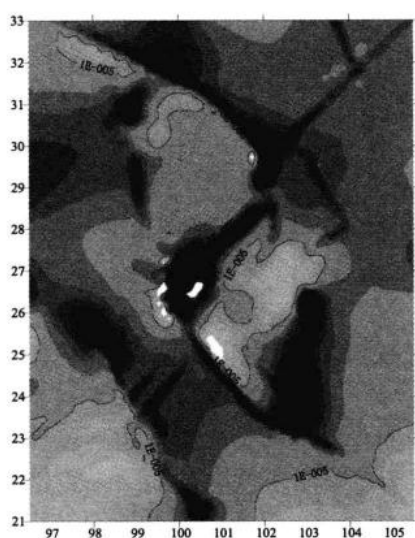
川滇地区动态应力场年的变化图像 (图 1-7) 特征为: ①应力场方向图像既改善了单独断层蠕动无法反映西北部应力场方向的问题, 也体现出了仅施加边界位移载荷所无法模拟的菱形块体内部的局部特征; ②最大主应力和平均应力在鲜水河断裂带、龙门山断裂带、丽江-小金河断裂带、小江断裂带等处集中; ③最大剪应力除在上述断裂带集中外, 还在腾冲-澜沧断裂带分段集中; 而且, 鲜水河断裂带和腾冲-澜沧断裂带附近成为最大剪应力的高梯度带。小江断裂带与则木河断裂带之间变化很大。



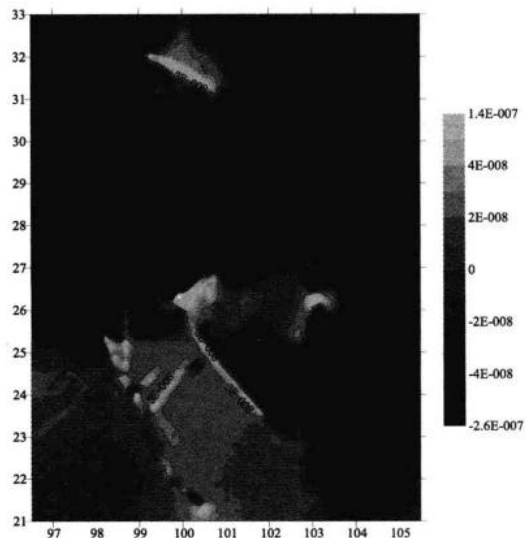
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-6 川滇地区动态形变场年变化图像

(a) 水平位移矢量; (b) 水平位移等值线; (c) 应变能密度等值线 ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$);
(d) 最大主应变等值线 (压性为负)