

川滇地区强震孕育的 深部动力环境研究

马宏生 张国民 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

川滇地区强震孕育的 深部动力环境研究

马宏生 张国民 刘杰 著
周龙泉 邵志刚 郑勇



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

强地震孕育的动力学环境是地震预测研究十分关注的问题,本书基于实际观测资料应用的研究工作,给出了川滇地区地壳和上地幔的结构特征、物性条件和动力作用特点,以分析该地区强震孕育的深部介质条件和应力应变条件,并利用数值模拟手段,研究了我国地震多发的川滇地区的地震动力学环境。

本书可供数字地震学和区域地球动力学等相关研究人员和高等院校相关专业师生使用,也可供地震、国土等部门专业人员、管理人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

川滇地区强震孕育的深部动力环境研究 / 马宏生等著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 11
ISBN 978-7-5084-8086-2

I. ①川… II. ①马… III. ①地震—动力地质学—研究—四川省②地震—动力地质学—研究—云南省 IV. ①P315.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第225299号

书 名	川滇地区强震孕育的深部动力环境研究
作 者	马宏生 张国民 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京全华高协教育咨询有限公司
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 6.5印张 161千字 2插页
版 次	2010年11月第1版 2010年11月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

构造地震的成因是国内外地震学家致力于探索的重要问题。许多学者对此进行了大量的探索,归纳起来,可以认为地壳结构与介质显著不均匀的部位是利于应力集中增强和应变能积累而发生大震的场所(震源区)。强震的孕育过程是在区域构造应力场的作用下,周围区域的构造运动与震源区介质非弹性变形相互作用的结果,是现代地壳构造运动的产物和表现。因此区域构造应力场、地壳结构、介质物性等的研究,成为研究地震孕育发生过程的重要内容。

本研究通过对川滇地区地壳上地幔相关介质物性参数研究,如区域P波速度结构、地震横波衰减的空间分布、尾波 Q_c 值空间分布等,获取川滇地区强震孕育的深部介质信息;通过区域构造应力场横向分块和纵向分层研究,如地壳S波分裂、中强地震震源机制解、GPS应变场和反映岩石形变历史的Pn各向异性以及反映上地幔各向异性的SKS分裂等,获取川滇地区各种物理参数所表征的深部动力学信息;通过构建动力学模型,以有限元数值模拟为工具,剖析不同圈层间的耦合关系,深化对地壳结构、介质物性以及应力应变场等的认识,进而揭示川滇地区强震孕育的深部动力学环境。

根据川滇地区205个区域台站记录的近60000条地震初至P波走时资料,采用层析成像理论与伪弯曲射线追踪方法,反演了川滇地区地壳上地幔的三维P波速度结构。结合区域地质构造以及地球物理背景,分析和解释了三维速度结构图像反映的川滇地区不同深度的介质结构与构造特征。结果表明:①川滇块体周缘大型活动断裂带附近的中下地壳内普遍存在低速层,其可作为调节断裂和块体运动的深部解耦层;②根据对P波速度结构图像的分析,识别和推断出川滇地区若干与古板块边界有关的深部构造特征,以及主要活动断裂带的倾向与延伸深度;③高山山地主要表现出速度负异常的特征,有的负异常可深达下地壳与上地幔,反映了新造山带的强烈构造隆升与相伴的重力均衡作用。

通过震源与速度结构联合反演,利用2000年4月至2006年3月云南和四川区域地震台网给出的初至P波走时资料,确定了川滇地区的三维速度结构,同时获得了川滇地区6642次中小地震的重新定位结果。结果表明:①川滇地区地震震源平均深度随震级增大而加深的特征明显,地震震级越大,震源深度越深,但震源下界不超过25km;②在瑞丽—龙陵、丽江—小金河以及龙门山等断裂带以西地区,震源深度偏浅,大多在15km以上,15km深度以下地震稀少;③川滇地区中小地震分布具有与强震相同的地壳深部介质背景,震源大

多分布于正负异常过渡区的速度相对较高一侧，而其下方主要为低速异常分布。

利用由 149 个台站记录的中国地震年报、四川和云南区域地震台网观测报告的 5897 个近震的 27530 条横波振幅与周期资料，反演得到川滇地区及周边（大致为南北地震带及邻近地区）的地壳衰减 Q_0 值（频率为 1Hz 时的 Q 值）空间分布图像。结果表明：川滇及周边地区的地壳横波衰减 Q_0 值在 200~600 范围内变化，平均值为 400，横向变化显著。在川西—滇西北—保山地区、云贵交界—昆明—思茅地区以及海原—祁连、汾渭和东昆仑等活动块体边界带的 Q_0 值明显较低，这些地区地震和构造活动相对活跃；而构造相对稳定的四川盆地、马尔康块体、桂西滇东断块以及鄂尔多斯等地区的 Q_0 值则明显较高。

利用云南地区 22 个区域数字地震台站记录到的，自 1999 年下半年至 2003 年年底的 5668 个地震的数字波形资料，采用 Sato 单次散射模型，计算了各台站周围 50 公里内的 1371 条地震记录的尾波 Q_c 。依据 Q_0 和 Q_c 的不同，将得到的 Q_c 进行分类。其分类结果显示云南地区的介质结构具有区域性分布特征，而且可以从地质构造、地震活动，以及大地热流分布等方面对其予以初步解释。总体来说，在构造复杂、活动强烈的滇中块体及其周边变形带上的 Q_c 值显著小于构造活动一般的其他区域；就地震活动性而言，高 Q_c 值的地方，通常没有地震发生或者仅仅发生较低震级的地震，而低 Q_c 值的地方则有较大地震发生；此外，云南地区的 Q_c 值的分布与大地热流分布也有负的对对应关系，即高热流区域的 Q_c 值低，低热流区域的 Q_c 值高。

利用云南及邻区遥测台网记录到的 6361 条近震数据，采用互相关系数法计算 16 个台站共 64 条 S 波分裂事件，同时收集了 8 个序列的 S 波分裂研究结果，初步给出了云南及邻区横波分裂的分布特征；应用哈佛大学给出的 43 个中强震震源机制解，利用其 P 轴方位角平均结果，给出了云南及邻区 3 个主要分区地壳应力场的最大主压应力方位；根据“中国地壳运动观测网络”基本网 1999~2004 年的观测资料，按观测点给出了云南及邻区的主应变率分布；此外，还搜集到云南及邻区的 SKS 分裂结果和 Pn 各向异性资料。通过研究发现：①云南及邻近地区不同分区（滇中块体、滇西南、滇西北）具有不同的地震动力学特征（同类动力学参量方位存在差别、不同动力学参量之间耦合程度不同）；②各类地震动力学参量所反映的力学行为随深度而变化，具有明显的分层特性；③由各分区地震动力学参量之间的耦合程度，似可显示出块体的分类特征（地壳型块体和岩石圈型块体）；④由于各块体间存在横向与纵向的动力作用差异，导致块体边界及其附近地区成为强震孕育和发生的最主要场所。

在前人工作基础上，基于多学科的新研究成果，综合考虑活动地块构造、

三维波速结构、大地测量、地震活动性等多种因素，建立了川滇地区的三维动力学模型。利用 GPS 观测资料，确定川滇地区有限元模型的边界位移速率，结合 SKS 各向异性资料确定上地幔顶部物质流动方式，模拟给出川滇地区地壳运动速度场图像，确定边界约束与底部拖曳力在川滇地区运动学及动力学研究中所起的作用。研究结果表明：川滇地区整体绕喜马拉雅东构造结旋转的 GPS 速度场特征主要受区域的边界动力作用控制，川滇地区中上地壳的应力场（震源机制解）分布特征同样受其区域的边界动力作用控制；川滇地区上地幔对地壳运动可能存在拖曳作用，且在北纬 26° 以南地区存在向西拖曳的可能性较大；在考虑川滇地区介质特性具有粘弹性时，滇中块体及其周边（ 100.9° — 103.4°E ， 22.9° — 27.6°N ）地壳出现上下层应力场解耦现象，区域内其他块体则上下耦合较强，表明川滇地区下地壳物质的流变强度在横向分区上存在差异可能是导致纵向应力场出现横向分区差异的主要原因。

通过以上较系统的研究，可以得到的总体认识是：地壳介质在结构、物性和动力作用等方面的非均匀性，特别是下地壳、上地幔介质的流变特性，和上地幔顶部对于地壳拖曳的深部动力作用等因素，是川滇地区强震孕育发生最为重要的深部动力学环境。

刘桂萍研究员、汪素云研究员、闻学泽研究员、江在森研究员、黄金莉研究员、许忠淮研究员、傅征祥研究员、王椿镛研究员、陈章立研究员、石耀霖院士、任金卫研究员、程万正研究员、傅容珊研究员、倪四道研究员、王善恩研究员、李志雄研究员、郑斯华研究员、申旭辉研究员等对本书完成给予了真诚帮助，提供了详尽细致的指导意见，在此向诸位专家表示衷心感谢。

在研究工作中，裴顺平博士、蒋长胜博士、华卫博士、陈连旺博士、薛霆琥博士、张浪平博士、任志坤硕士以及王伟君副研究员、范军副研究员等都曾给予各式帮助，在此一并致谢。

由于印刷限制，书中有些彩图单色印刷后不太清楚，为了保证阅读效果，在书后附印上了彩图，彩图编号与正文中相同。正文中图名后加“*”号者表示文后有其对应的彩图。

本书得到中国地震行业专项（200708038）、国家重点基础研究规划项目“活动边界带的动力过程与强震预测”（2004CB418403）和科技部社会公益研究专项“2006~2020 年全国地震重点监视防御区确定”（2004DIA3J010）的资助，在此谨表谢意。

马宏生

2010 年 10 月

目 录

前言

第一章 引言	1
第一节 研究背景	1
第二节 研究目标与研究思路	6
第三节 主要研究内容	7
第二章 川滇地区三维 P 波速度结构反演与构造分析	12
第一节 三维 P 波速度结构的反演	12
第二节 反演结果及其构造分析与解释	17
第三节 讨论与结论	24
第三章 川滇地区中小震重新定位与孕震环境研究	27
第一节 资料与方法	27
第二节 定位结果及其分析	29
第三节 小结	33
第四章 川滇及周边地区地壳横波衰减的成像研究	34
第一节 资料与反演方法	34
第二节 计算结果与分析	36
第三节 分辨率与误差分析	38
第四节 讨论	39
第五节 小结	40
第五章 云南地区尾波 Q_c 值空间分布特征及其解释	42
第一节 尾波 Q_c 值的单次散射计算方法与步骤	42
第二节 资料选取与计算结果	44
第三节 尾波 Q_c 值的区域分布特征及初步解释	47
第四节 小结	49
第六章 云南及邻区应力应变场分区耦合特性研究	51
第一节 地壳横波分裂	51
第二节 地壳应力场与 GPS 应变场	56

第三节	不同圈层的力学耦合行为分析	60
第四节	小结	62
第七章	川滇地区强震孕育发生的深部动力学环境模拟研究	63
第一节	川滇地区地壳上地幔三维有限元模型	63
第二节	三维有限元模型的加载条件	68
第三节	川滇地区构造活动的动力学图像及特征分析	71
第四节	讨论	76
第五节	小结	77
第八章	结论与讨论	79
第一节	主要结论与认识	79
第二节	讨论	81
第三节	存在的问题及进一步研究方向	83
参考文献		85

第一章 引 言

第一节 研 究 背 景

一、大陆强震孕育环境研究

大陆地震发生在大陆地壳内，大陆地壳最大的特点是其在横向和纵向的结构与物性方面都存在很强的非均匀性，从而构成了大陆强震孕育的复杂环境条件（Dewey J F, 1972; 张少泉, 1986）。大陆地壳在横向和纵向上的非均匀性表现在横向分块、纵向分层（杨理华, 1980）。横向分块构成了活动地块思想的基本科学依据；纵向分层构成了不同地块间内部结构差异的基本标志。

基于中国大陆活动构造及其现代构造变形的研究，在张文佑、马杏垣、丁国瑜等学者研究的基础上（张文佑, 1984; 马杏垣, 1989; 丁国瑜, 1991），科技部重大基础研究规划项目“大陆强震机理与预测”较系统地提出了中国大陆活动地块科学假说，并给出了活动地块划分及其对中国大陆强震的控制作用等一系列研究成果（张国民, 1999, 2000; 张培震, 2003; 张国民, 2004, 2005）。由于活动地块相对完整并有相对统一的运动方式，所以不同活动地块之间的运动、变形和深部结构等的差异主要集中在各活动地块之间的边界带上（亦称活动边界）。因此，活动地块边界是活动地块之间差异运动和相互作用的边界带，也是地壳变形的局部化带和应力应变的集中带，从而往往是强震孕育、发生的主体地带，亦是中国大陆最基本和重要的强震带（图 1-1）。

所有的地块不仅在水平方向上受到活动断裂的围限，在垂直方向上岩石圈强度与内部结构也有很大差异（图 1-2）。目前对于大陆地壳强度的基本认识是，地壳中存在一个由摩擦强度（Byerlee 摩擦定律）控制的高强度的上部地壳和一个由石英（花岗岩）流变强度控制的低强度的下部地壳。考虑到实际地壳中介质分布的复杂性，这种强度模型过于简化。如果考虑下部地壳中石英闪长岩和辉长岩的存在，根据高温高压流变实验结果，则地壳中可能出现多重脆—塑性变形的转化，从而出现多个由摩擦控制的强层和流变控制的弱层的交替出现（“大陆强震机理与预测”项目结题报告, 2003）。杨晓松等（2003）依据现代实验岩石学、实验岩石物理学、地球物理学、地质学等的研究成果，对青藏高原—川滇地区块体底部边界之成因属性和岩石物理性质进行分析认为，可以将大陆块体划分为两种基本类型，地壳型块体和岩石圈型块体；地壳型块体是由上部地壳所构成，壳内软弱带为其底部边界带和潜在解耦带；岩石圈型块体在岩石圈尺度上是力学耦合的，以上地幔软流圈的顶面为其底部边界。张国民等（1985, 2002, 2003）通过对中国大陆地震震源深度分布特征的研究，结合中国大陆地热研究相关成果，探讨了中国东、西部地壳内脆韧性转化带的深度。

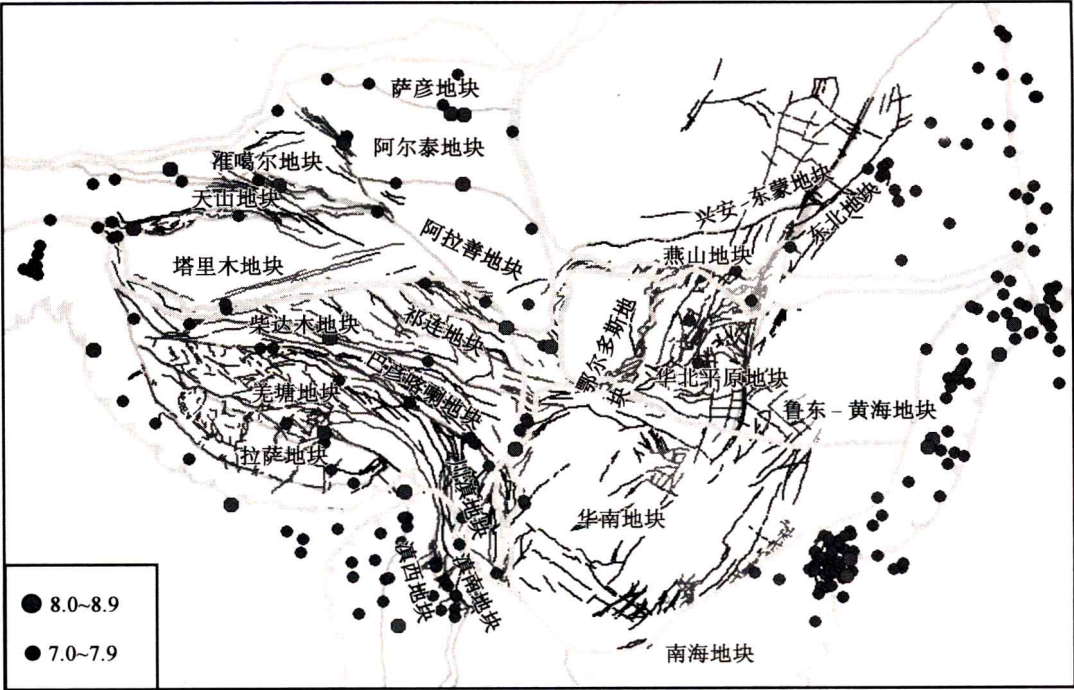


图 1-1 中国大陆的活动断裂、活动地块与强震分布
(据“大陆强震机理与预测”项目结题报告)

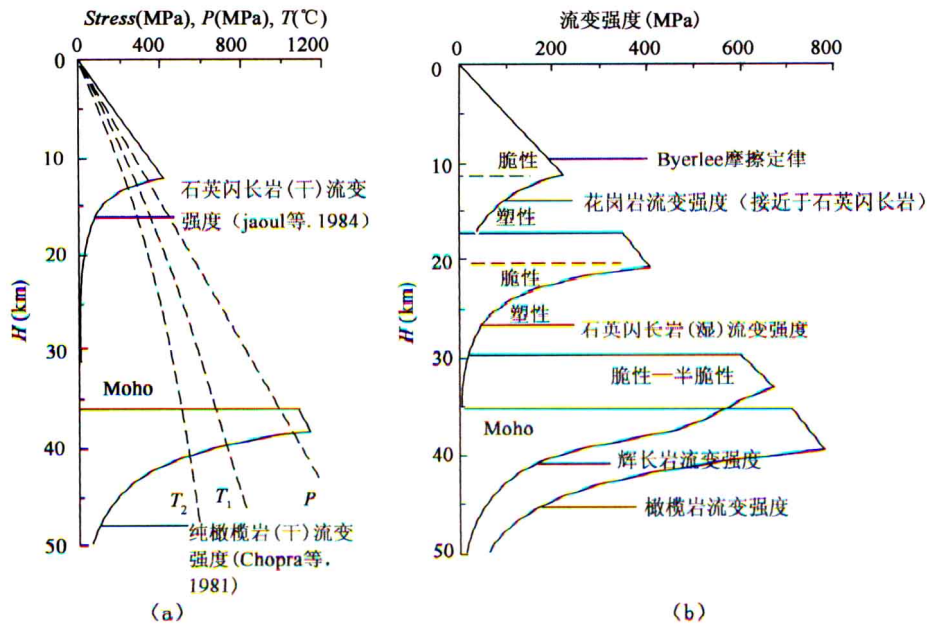


图 1-2 岩石圈强度模型 (据“大陆强震机理与预测”项目结题报告)
(a) 介质分布简单的简化模型; (b) 介质分布较复杂的模型
Moho—莫霍面; Stress—应力; P—压强; T—温度; H—深度

地震是一个力学过程,地球物理探测和研究揭示的强震孕育的结构和介质物性条件尚需要与介质的力学性质相联系,才能深入理解强震孕震和发生的物理机制。大陆岩石圈的应力状况,作为大陆动力学研究的基本内容之一,同样受到地学界的广泛关注。人们常采用井孔变形、水压致裂和井壁崩塌等原地测量方法推测浅层地壳的应力状况,采用震源机制解方法估计地壳内多震层的应力方向,这些研究成果为认识大陆动力学过程和岩石圈脆性层的构造应力场积累了很多宝贵资料,并提供了重要依据。大陆岩石圈的力学行为随深度的增大而变化,具有明显的分层特性,即由脆性、半脆性的上层(上地壳),向半韧性、韧性的下层(下地壳和上地幔)过渡(王绳祖,1985,1993)。王绳祖等(1993a,1993b,2001,2002a,2002b)根据大陆岩石圈网络状流动与多层构造变形观点,认为板块边缘驱动力主要通过岩石圈下层的网络状塑性流动实现其远程传递,并牵引上层,控制板内构造变形和地震活动,从而形成多层构造应力场。任金卫(2004)在研究了大陆壳幔运动的耦合关系后,认为这种分层的耦合作用对地块的活动性和强震发生等有重要的影响,特别是在研究中国大陆地壳运动的动力学问题时,这种作用就显得更为重要。

二、川滇地区强震孕育动力学研究

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。川滇地区地处青藏高原(青藏活动地块区)东南侧,45Ma以来印度板块向中国大陆的强烈碰撞,不但导致青藏地区地壳缩短和隆升,而且导致青藏地区物质横向(东向)溢出。然而东流物质在其东部由于受到四川地台的抵阻,进而只得向东南方向移动。因此,川滇地区地质构造活动和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(李坪,1975;阚荣举等,1977;马杏垣,1989;丁国瑜,1991;虢顺民等,2000;马丽芳,2001;邓起东等,2002;张培震等,2003;徐锡伟等,2003)。川滇地区活动断裂发育,新构造活动十分强烈,强震大多发生在主要断裂带上(图1-3)。

从强震活动角度来看,川滇地区是中国大陆地震活动最强烈最频繁的地区之一。仅四川和云南两省,按中国地震局预报处整编和续编的《中国强震目录》,公元前26年~2001年,川滇两省共发生5级以上地震639次,其中5.0~5.9级地震475次,6.0~6.9级地震124次,7.0~7.9级地震39次,8级地震1次(韩渭宾等,2004)。据20世纪资料统计,中国大陆共发生7级以上的强震63次,而川滇地区就发生了20余次,约占30%。自20世纪70年代以来,相继发生了一系列强烈地震,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年澜沧一耿马7.4级地震、1995年孟连西南7.3级地震以及1996年丽江7.0级地震等。因此,针对川滇地区进行强震的深部动力学环境研究对理解川滇地区板块动力作用、韧性层加载和川滇地块侧向挤出等科学问题具有重要意义,尤其对研究强震孕育的深部动力学环境有特殊意义。

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;崔效峰等(1999)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构造应力场与地震构造；钟继茂、程万正等（2006）根据川滇地区 256 次中强地震震源机制解，以滑动方向拟合法反演给出了 13 个地震带（区）的应力张量。

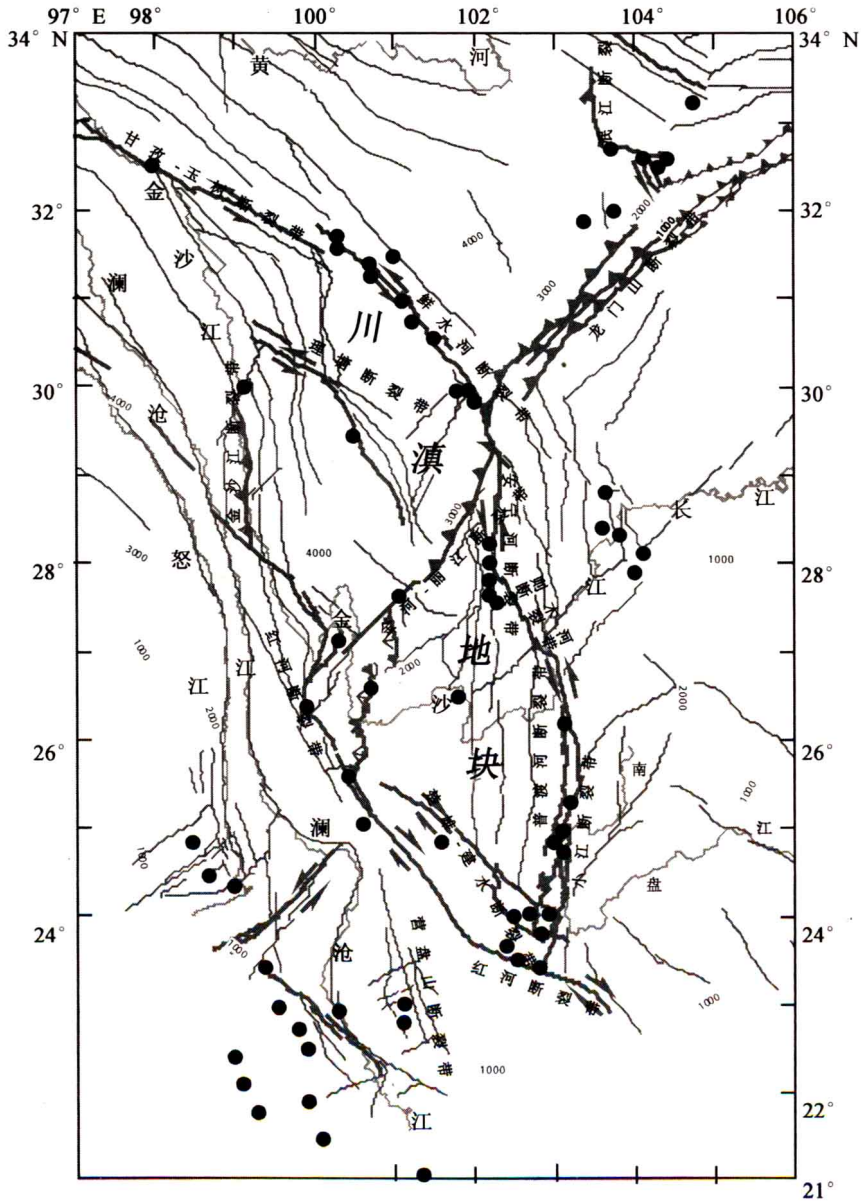


图 1-3 川滇地区活动断裂与历史强震 ($M_s \geq 6.7$) 分布

King, et al. (1997)、张培震等（2002）和申重阳等（2002）根据 GPS 观测资料研究了区域的构造变形特征；徐锡伟等（2003）探讨了川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源；张希等（2003）通过对 1991~1999 年、1999~2001 年川滇地区 GPS 水平运动资料的非震负位错模型反演和形变应变场时空演化分析，结合地质构造，研究了块体及边界带的构造变形特征及其与强震孕育的关系；乔学军等（2004）利用川滇地区 1998~

2002 年间 200 多 GPS 点位的多期复测结果, 将川滇地区分为 9 个次级活动块体, 计算了各个活动块体的欧拉旋转矢量和主要活动断裂的运动速度, 并分析了该地区的应变场特征; 吕江宁等 (2003) 通过分析中国地壳运动观测网络的 GPS 数据得到川滇地区地壳水平运动速度场, 并由此重新划分了活动块体和分析了各块体的运动特征; 李铁明等 (2003) 通过分析 20 世纪 80 年代以来的川滇地区跨断层形变测量资料、区域垂直形变测量资料及部分大区域 GPS 测量资料, 并根据地震分布特征提出了川滇地区活动地块分阶段活动性特征 (即时段性划分) 的概念, 并给出了初步的划分结果。

对川滇地区岩石圈结构的研究, 近几年来尤其是层析成像取得很多新的研究成果。孙若昧等 (1991) 由四川地震台网的 P 波数据进行的层析成像方法研究, 得到了该区地壳及上地幔速度图像的信息, 认为该区主要断裂同速度差异带对应。赵永贵等 (1992) 应用地震层析及地质解释方法研究了滇西造山带的地壳、下岩石圈及软流圈构造, 并与人工地震测深及大地电磁测深结果进行了比较。刘福田等 (2000) 通过地震层析成像方法揭示出滇西特提斯造山带下 250km 深度的板块状高速异常。秦嘉政等 (2000) 利用地震体波层析成像方法, 给出了腾冲火山区上地壳低速、中地壳高速和下地壳上地幔低速的速度分布特征。根据 1999 年腾冲火山区人工地震探测资料, 楼海等 (2002) 用地震层析成像方法反演了该火山区上地壳三维 P 波速度结构, 结果显示在腾冲火山区下方的上地壳内存在明显的 P 波低速区。黄金莉等 (2001, 2002) 应用地震体波层析成像方法, 首次反演得到了川滇活动构造区详细的三维 P 波速度结构, 结果表明: 上地壳速度图像与地表地质特征明显相关, 四川盆地低速区, 高原地带为明显的高速区, 沿康滇地轴为显著的高速条带; 10~85km 深度的速度图上显示, 腾冲火山附近形成一低速柱; 大型活动断裂带两侧存在明显的速度差异; 强震位置、活动断裂及速度结构三者之间存在一定的关联性, 大部分构造型强震发生在由大的活动断裂勾画的块体边界上, 而那些发生在非大断裂附近的强震几乎都集中在下部中地壳存在低速带或由低速带向高速带过渡的位置, 因而推测下部低速层的存在可能是上部中强地震活动的构造背景。雷建设等 (2002) 利用 ISC 报告以及中国和 NEIC 基本测震台网报告中的 80974 条 P 波初至到时资料 (地震数为 7053, 台站数为 165), 对中国西南及邻区北纬 $10^{\circ}\sim 36^{\circ}$ 、东经 $7^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 的深至 400km 的上地幔三维速度结构进行了反演。王椿镛等 (2002, 2003) 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 波走时资料, 并结合深部地球物理资料, 确定了川滇地区地壳、上地幔三维速度结构, 认为川滇地区地壳结构的总体特征是: 地壳和上地幔的较低的平均速度, 地壳厚度剧烈的变化, 地壳和 (或) 上地幔存在的高导层、高热流值, 这些都跟印度板块与欧亚板块碰撞的构造背景有关; 在主要的地震带上, 中下地壳的负速度异常与地震活动性相关; 多数强烈地震发生在具有正速度异常或正常速度分布的上中地壳上, 而其下方则通常是负速度异常带。

地震波在传播过程中能量的衰减是传播介质的非弹性性质的反映。与弹性波速相比, 地震波的衰减对地球结构和组成的变化更敏感。Q 值是温度和相变所致晶体结构变化的一个敏感指标, 在了解地球内部介质的非弹性性质和推断其热力学状态方面均有重要的应用价值。秦嘉政等 (1985, 1986, 1987, 1988) 运用尾波对云南地区地震波衰减特征进行了研究。苏有锦等 (2006) 采用 Atkinson 方法和遗传算法, 研究了云南地区 S 波的非弹性衰减 Q 值, 并讨论了 Q 值的分区特性。丛连理、胡家富等 (2002, 2003) 则运用叠加谱

比法 (SSR) 计算了中国大陆及云南地区 Lg 尾波的 Q 值, 得到了中国大陆地壳中 Lg 尾波的 Q 值, 其结果显示最低的 Q 值存在于滇藏地区, 在 200~250 之间; 最高的 Q 值发生在西伯利亚地台的南端, 在 450~500 间变化。

对川滇地区强震孕育动力过程的机理研究, 近年来也取得了较大进展。王凯英 (2003) 利用有限元模拟研究了川滇地区应力场的力源及其影响因素, 并将断层相互作用与块体活动联系起来, 探讨了块体运动、块体相互作用与断层相互作用的关系。陈连旺 (2004) 利用有限元法, 基于多学科的最新研究成果, 综合考虑活动地块构造、三维波速结构、大地测量、地震活动性等多种因素, 建立了川滇地区三维地壳上地幔有限元模型, 定量研究了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; 结合下地壳物质流动, 模拟了川滇地区构造应力应变场的年平均变化图像, 给出了边界位移速率、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。朱守彪 (2004) 使用震源机制, 地质资料等主应力方向和断层类型资料为约束条件, 采用遗传有限元法反演了川滇地区下地壳流动对上地壳的拖曳作用; 反演结果表明川滇菱形块体下地壳易于流动, 因此运动的速度比上地壳大, 下地壳对上地壳有拖曳作用, 认为观察到的川滇菱形块体运动是在边界力和其底部所受拖曳力的共同作用下形成的。

第二节 研究目标与研究思路

一、研究目标

构造地震的成因是国内外地震学家致力于探索的重要问题。许多学者对此进行了大量的探索, 归纳起来, 可以认为地壳结构与介质显著不均匀的部位是利于应力集中增强和应变能积累而成为发生大震的场所 (震源区)。强震的孕育过程是在区域构造应力场的作用下, 周围区域的构造运动与震源区介质非弹性变形相互作用的结果, 是现代地壳构造运动的产物和表现。因此区域构造应力场、地壳结构、介质物性等的研究, 成为研究地震孕育发生过程的重要内容。

本书通过对地壳上地幔相关介质物性参数研究, 如区域 P 波速度结构、地震横波衰减的空间分布、尾波 Q_c 值空间分布等, 获取川滇地区强震孕育的深部介质信息; 通过区域构造应力场横向分块和纵向分层研究, 如地壳 S 波分裂、中强地震震源机制解、GPS 应变场和反映岩石形变历史的 Pn 各向异性以及反映上地幔各向异性的 SKS 分裂等, 获取川滇地区各种物理参数所表征的深部动力学信息; 通过构建动力学模型, 以有限元数值模拟为工具, 剖析不同圈层间的耦合关系, 深化对地壳结构、介质物性以及应力应变场等的认识, 进而揭示川滇地区强震孕育的深部动力学环境。

二、研究思路

图 1-4 给出了本书的总体科学思路框图。根据总体思路框架图, 用层析成像理论反演了川滇地区地壳上地幔三维 P 波速度结构, 并在结合区域地质构造以及地球物理背景的基础上, 分析了川滇地区不同深度地壳上地幔介质结构与川滇地区活动块体之间深浅耦合关系, 进而基于速度结构分析初步揭示了川滇地区的深部动力作用环境; 通过震源与速度

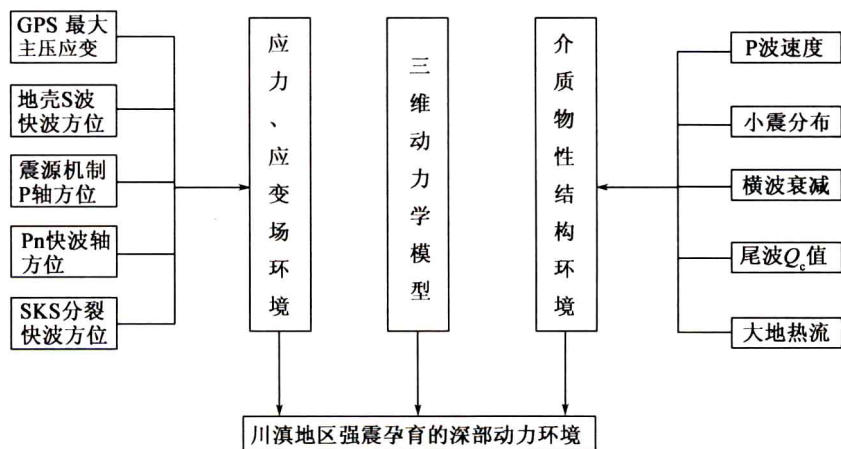


图 1-4 本书的总体科学思路框图

结构联合反演，获得了川滇地区 6642 次中小地震的重新定位结果，通过对重新定位后的震源深度分布特征进行了分析，结合速度结构特点，初步探讨了川滇地区孕震的介质环境；利用中国地震年报、四川和云南区域地震台网观测报告等测定近震震级 M_L 所用的振幅与周期等数据来研究了区域内介质的衰减特征，以成像技术为核心，给出了川滇及周边地区的地壳衰减 Q_c 值空间分布特征，并讨论了区域内台站的场地响应特征和 Q 值分布与传播路径不同引起的震级偏差之间的关系；利用云南地区 22 个区域数字地震台站记录到的，自 1999 年下半年至 2003 年年底的，近 6000 条地震的数字地震波形资料，采用 Sato 单次散射模型，计算了云南地区各台站周围 50km 内的尾波 Q_c 值，并初步揭示了尾波 Q_c 值所反应的云南地区介质物性的区域分布特征；通过对云南地区地壳 S 波分裂、中强地震震源机制解、GPS 应变场和反映岩石形变历史的 Pn 各向异性（黄金莉等，2003）以及反映上地幔各向异性的 SKS 分裂（常利军等，2006）等研究，获取云南及邻区岩石圈应力应变场的横向分块和纵向分层信息，剖析不同圈层间的耦合关系；基于上述最新研究成果，综合考虑活动地块构造、三维波速结构、大地测量、地震活动性等多学科资料，建立了川滇地区三维地壳上地幔有限元模型，利用有限元方法，定量研究川滇地区的动力边界条件，并结合上地幔底部拖曳和下地壳物质流动，模拟作为川滇地区强震孕育背景动力环境的构造应力应变场的横向分块和纵向分层特征。根据前面三个方面以及以前的研究成果，对川滇地区强震孕育的深部动力学环境形成初步认识。

第三节 主要研究内容

一、川滇地区地壳上地幔精细速度结构研究

地震层析成像技术的飞速发展给人类提供了一个探测地球内部结构的强有力的工具，也给人类展示了一片新的天地，使人类更加清晰地在两个层次之上（地球的圈层构造和内部横向不均匀性）了解地球内部，特别是从全球和区域的尺度上揭示出地球内部地壳和上地幔的横向不均匀结构（刘福田，1991；傅淑芳，1994；郑斯华，1994；朱介寿，1996；

丁志峰, 2000; Zhao Da peng, 2000, 2001; 傅容珊, 2001; 赵大鹏, 2001a, 2001b; Huang Jin li, 2002; Wang Chunyong, 2003; 吴振利, 2003)。近几年来, 层析成像在川滇地区强震与火山孕育环境研究方面也取得很多新的研究成果(秦嘉政, 2000; 黄金莉, 2001; 王椿镛, 2002; Huang, et al., 2002; Wang, et al., 2003)。

本书第二章在前人研究基础上, 根据云南省和四川省 205 个地震台站在 2000 年 4 月至 2006 年 3 月期间记录的近 7000 次地震的 6 万余条初至 P 波走时资料, 用层析成像理论与伪弯曲射线追踪方法反演了川滇地区地壳上地幔的三维 P 波速度结构; 并在结合区域地质构造以及地球物理背景的基础上, 分析了川滇地区不同深度的介质结构以及深浅构造的耦合关系, 讨论给出了主要断裂的倾向、延伸深度以及块体活动的底部解耦条件等; 同时, 基于速度结构的分析, 初步揭示了与区域活动块体和地震有关的深部构造背景与动力作用环境, 为探讨川滇地区的强震孕育的构造环境提供了依据。

二、川滇地区中小震重新定位与孕震环境研究

地震定位是地震学中最经典、最基本的问题之一, 对于诸如地震活动性构造、地球内部构造、地震预报等的研究具有重要意义。震源位置的精度主要受到地震台网的布局、可用定位的震相、地震波到时读数的精度以及所取的地壳速度结构模型等因素的影响(Pavlis, 1986; Gomborg, et al., 1990)。目前常规的地震定位方法大多源于 Geiger (1912) 提出的一种线性的绝对定位方法, 该方法对初始值的依赖性较大。相对地震定位方法主要有主事件定位法和双差定位法, 其可以有效减小速度结构误差的影响(Poupinet, et al., 1984; Got, et al., 1994)。在主事件定位方法中(Spence, 1980; Ito, 1985; Frémont and Malone, 1987; 周仕勇等, 1999), 每个事件仅相对于一个事件, 即主事件重新定位。由于定位过程中所有事件必须和主事件相关, 因此该方法限制了可重新定位地震丛的最大空间范围。为了克服主事件定位方法的缺陷, Waldhauser 等(2000)提出了双差定位方法, 其可以对很多较大空间范围内发生的地震同时进行重新定位。

提高地震定位精度是地震学应用研究的重要课题之一, 在现有的地震定位方法和地震监测条件下, 采用高精度地壳速度结构模型对地震定位精度的提高将是较为重要的。随着地震层析成像技术的发展(Aki, et al., 1976; Thurber, 1983; 刘福田等, 1989; Zhao, 1992), 大量三维地壳速度结构模型的建立, 将为地震定位提供良好的研究基础。Smith, et al. (1996) 针对已知的 26 个核爆事件和 83 个有良好定位结果的地震事件, 对比分析了全球三维 P 波速度 SP12/WM13 模型和一维的 J-B、PREM、IASP91 模型对全球远震定位精度的影响, 结果表明三维模型的定位结果明显好于一维模型的结果, 定位偏差可减少 40% 左右。此外, 可以在地震层析成像过程中加入震源项, 同时确定三维速度结构和地震震源参数, 即震源和速度结构的联合反演(Crosson, 1976; Pavlis and Booker, 1980; Spencer and Gubbins, 1980; Thurber, 1983; 刘福田, 1984; Michael, 1988; Kissling, et al., 1994), 该方法在提高定位精度的同时得到速度结构, 这有助于对地震的孕震环境提供物理解释。

本书第三章通过震源与速度结构联合反演研究, 在第二章确定了川滇地区的三维速度结构的基础上, 获得了川滇地区 6642 次中小地震的重新定位结果, 通过对重新定位后的震源深度分布特征进行分析, 结合速度结构特点, 初步探讨了川滇地区孕震的介质环境。

三、川滇地区地壳横波衰减结构研究

地震波不仅可以提供地球内部构造信息,而且还能够提供地球内部物质的成分、晶体结构和物态、温度、物质流动等重要信息,因此成为研究地球内部结构及其动力系统最重要的手段之一,并且越来越发挥重要的作用(Andson, et al., 1962; Canas, et al., 1978; Dogan, et al., 1992; Dziewonski, et al., 1982)。

在以往对川滇区域的地壳上地幔三维结构研究中,人们比较注重地壳上地幔三维速度结构的研究(孙若昧等, 1991; 赵永贵等, 1992; 刘福田等, 2000; 秦嘉政等, 2000; 楼海等, 2002; 黄金莉等, 2001, 2002; 雷建设等, 2002; 王椿镛等, 2002, 2003)。这是因为一方面用速度结构可以解释地球内部三维结构某些方面的特征,另一方面对计算速度参数而言,它牵涉的因素相对比较少。但是,速度参数只是利用了地震波的运动学信息,而忽略了地震波动力学的特征信息(Romanowicz, 1987, 1990, 1994, 1995)。因此,只用三维速度分布解释地球内部结构是不全面的。

介质的品质因子是度量地球内部介质非弹性性质的重要参数,既包含介质对地震波能量的吸收,也包含了对地震波的散射。因此,不同的构造区有不同的衰减特性。普遍认为介质衰减的品质因子 Q 值与地壳的结构特征,如火山区的岩浆分布、构造活动区的断层分布、壳内低速层等,有密切的联系。此外,大多数衰减研究都集中在对数字地震波形的研究,包括 L_g 和长周期面波的成像研究等(Rapine R, et al., 1997; Mitchell B, et al., 1997; 李光品等, 2000; Cong L L, et al., 2003; 洪学海等, 2003; 胡家富等, 2003; Zhao J, et al., 2003; 刘建华等, 2004a, 2004b; Xie J, et al., 2004; Maceira M, et al., 2004)。尽管这些新方法和技术的应用可以提高相关参数测定的精确性,但大多数区域受到台站密度和资料数量的限制,由于数字地震台网记录时间尚短,造成目前观测资料覆盖不足,以至于利用数字地震波形计算得到的结果多为区域平均结果、横向分辨率较低。因此,合理应用以往数十年模拟记录积累的大量资料开展相关研究也是非常有价值的。

本书第四章,在第二章速度结构研究基础上,补充了中国地震年报、四川和云南区域地震台网观测报告测定近震震级 M_L 所用的振幅与周期等数据,以成像技术为核心,给出以川滇为核心的南北地震带及其周边地区的地壳衰减 Q_0 值空间分布,并讨论了区域内台站的场地响应特征和 Q_0 值分布与传播路径不同引起的震级偏差之间的关系。

四、云南地区下地壳尾波 Q_c 值分布特征研究

在近源地震图中, P 波和 S 波到达后有较长时间的后续振动记录,分别称为 P 尾波和 S 尾波。尾波的存在可以认为是介质不均匀性的最明显证据之一。当尾波仅限于距台站很近而且震级较小的地震时,尾波所反应的介质特性不再依赖于震源和观测点位置,而是其所在区域平均物性的表现。

尾波 Q 值所反映的品质因子与地区的构造活动性和地震活动性密切相关,这一特性曾作为预测地震的一个因素而加以研究(Chouet, 1979; Jin, Aki, 1986, 1989)。在云南地区,秦嘉政(1992)和秦嘉政等(1995)用模拟记录研究尾波 Q 的区域变化和大震前后的起伏,发现大震前在主震震中附近的近源区的 Q 值较高,大震后变小 30 左右;而主震