

纪念地震活动图像与数字地震观测资料
应用研究实验室成立10周年特刊

数字地震资料应用研究

主 编 赵翠萍

副主编 王勤彩 华 卫

地 震 出 版 社

纪念地震活动图像与数字地震观测资料
应用研究实验室成立 10 周年特刊

数字地震资料应用研究

主 编 赵翠萍

副主编 王勤彩 华 卫

地 震 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

数字地震资料应用研究 / 赵翠萍主编.

—北京: 地震出版社, 2011.5

ISBN 978-7-5028-3872-0

I. ①数… II. ①赵… III. ①数字技术—应用—地震观测—文集

IV. ①P315.61-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 054950 号

地震版 XM 2204

数字地震资料应用研究

主 编: 赵翠萍

副主编: 王勤彩 华 卫

责任编辑: 刘晶海

责任校对: 庞亚萍

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: 68455221

专业图书事业部: 68467982 68721991

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: 2011 年 5 月第一版 2011 年 5 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 857 千字

印张: 35.25

印数: 001~500

书号: ISBN 978-7-5028-3872-0/P (4513)

定价: 100.00 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

中国地震局地震预测研究所（原分析预报中心）地震活动图像与数字地震观测资料应用研究实验室建于 2002 年，是在中国地震局原局长陈章立研究员的倡导下成立的。多年来，在陈章立研究员、郑斯华研究员等老师的带领下，实验室本着开放联合、相互帮助、共同提高的宗旨，与全国 23 个省（区，市）地震局及有关直属单位开展了合作研究，培养了 100 多名从事数字地震观测资料应用研究的青年科技骨干，建立了新型的所、局合作关系，形成了以实验室为主体、多单位联合的地震科研团队，为推进数字地震观测资料的应用和地震预报研究的深入开展做了大量工作。实验室前 4 年的工作主要侧重于新的地震参数和介质参数测定方法的研究，有关的研究成果已汇集于 2007 年出版的《数字地震观测资料应用研究》。近 5 年来，实验室的研究领域逐渐扩展，在地震震源参数测定、地震震源机制解、应力场、强震破裂过程、三维地壳介质结构（包括速度结构、衰减结构、散射结构）成像等方面开展了深入研究。

5 年来，实验室以服务于防震减灾为目标所开展的广泛探索取得了一批新的成果。尤其是 2008 年 5 月 12 日汶川 8 级地震发生后，在陈章立研究员的安排与指导下，实验室成员立即收集区域台网及震后流动台站记录的大量地震震相和波形数据，开展了有关的研究。这些研究阐明了汶川 8 级地震发生的区域地震活动背景和发生过程，尤其是揭示了地震破裂和震区应力场分布的不均匀性特征，指出龙门山断裂带北东段与南西段破裂机制明显有别，北东段破裂是由于南西段的主破裂所触发的，相应地北东段和南西段余震衰减特征也明显有别，为震后地震趋势判断提供了某些依据。同时，作为承担正在开展的国家重点科技支撑项目“水库地震监测预测技术研究”任务的主要研究团队之一，实验室将数字地震学研究的有关成果应用于水库诱发地震的研究，取得了一些新的认识，其中主要认识包括①绝大多数水库诱发地震发生在距库岸 10km 以内区域，特别是库岸附近、震源在 10km 以内的深度范围里；②相对于构造地震，水库诱发地震的应力降显著较低。这是水库诱发地震有别于浅源构造地震的重要特征，也是识别水库蓄水后，库区发生的地震是否为水库诱发地震的主要依据。

为了与同行们共同推进数字地震观测资料的应用和地震预报研究的深入，本书挑选了上述研究在国内外核心以上刊物发表的 52 篇文章汇编成集，以供同行们参考，并恳请大家予以指正。

李志雄研究员为本书的出版做了大量的组织和指导工作，和平硕士负责了论文的收集和统编，特此致谢！

编 者

序 言

进入 21 世纪以来,全球 8 级左右及以上大震频繁发生,2004 年 12 月 26 日印度尼西亚 8.7 级大震、2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级、2010 年 2 月 27 日智利 8.8 级大震以及 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级巨震等地震的发生给人类造成巨大的灾难,尤其是日本福岛 9.0 级巨震不仅对当地人民生命财产造成巨大损失,其次生灾害—海啸对核电站的破坏造成的核泄漏对当地,乃至全球生态环境的影响尚难以估量。地震以其瞬间巨大的破坏力而成为人类生存面临的最大威胁,有效减轻和防范地震灾害是人类社会的迫切需求,依靠科技进步开展地震预测探索是减轻地震灾害的途径之一。地震一方面对人类造成巨大灾难,另一方面却给人们认识地球、探索地震过程和孕育规律,开展地震预测研究,实现攻克地震预报难关的美好愿望提供了机会。地震发生的物理实质决定着要预报地震就必须探测和研究地壳介质和应力状态的时空演化过程,而地球内部的“不可见性”使这种探测和研究遇到了种种困难,但值得庆幸的是,现代数字地震观测技术的诞生和区域数字地震观测台网的建立正逐步为克服这种“不可见性”提供了重要的途径。俄国科学家伽里津说过:“地震犹如一盏明灯照亮了地球内部。”通过对地震的观测,人们可以从地震波中提取反映地震孕育的重要信息,进而逐步提高对地震孕育及发生过程的认识。纵观地震学研究现状,人们对地震的每一个新的认识,无不是基于地震数字化观测技术的进步和对观测资料处理技术的突破之上而获得提高,因此,大力开展地震观测技术和数字地震观测资料信号提取技术的研发和应用是促进人们对地震过程认识的关键之一,具有非常重要的意义。

以陈章立研究员和郑斯华研究员为核心,老、中、青科技人员相结合的中国地震局地震预测研究所(原分析预报中心)地震图像与数字地震观测资料应用研究实验室(后简称“实验室”)研究团队建于 2002 年,9 年来该研究团队一直致力于数字化地震观测资料分析处理技术、方法的推广与应用研究,本着“开放联合,相互帮助,共同提高”的宗旨,该实验室与 23 个省(区,市)地震局及有关直属单位开展了合作研究,为合作单位培养了 100 多名从事数字地震观测资料应用研究的青年科技骨干,并无偿地提供了大量的软件。建立了新型的所、局合作关系,形成了以实验室为主体,多单位联合的地震科研团队,为推进数字地震观测资料的应用和地震预报研究的深入开展了大量的工作。

9 年来,实验室的工作大致经历了两个阶段,前 4 年的工作主要侧重于新的地震参数和介质参数测量方法的研究,有关的研究成果已汇集于 2007 年出版的《数字地震观测资料应用研究》;2006 年以后的 5 年,该团队的研究领域逐渐扩展,研究不断深入。围绕与地震预报紧密关联的问题,开展了广泛的研究,并取得一批有一定科学意义和使用价值的科研成果。为了与同行们共同推进数

字地震观测资料的应用和地震预报研究的深入，特挑选这个团队近 5 年来在国内外核心以上刊物上发表的 52 篇文章汇编成集。这些文章体现了该团队在过去 5 年里主要开展的工作：

一、地震精定位：为减小速度模型和震相读数误差的影响，分别采用了双差（DD）定位法和波形互相关技术（WCC），研制或改进了有关的数据处理软件，显著地提高了地震定位的精度。

二、地壳介质结构的研究：采用国际上先进的新方法，如速度结构的双差层析成像， Q 值层析成像和吸收系数与散射系数的分离及散射系数的层析成像等，研究了地壳介质的速度结构、衰减结构和散射结构。研制或改进了有关的软件，并应用于某些地区，揭示了地壳介质的非均匀性特征与地震空间分布的关系。

三、区域应力场的研究：鉴于传统的用 P 波初动极性求解震源机制的局限性，采用 P 波与 S 波振幅比，结合可靠的 P 波初动极性数据求解小震震源机制，并利用少量宽频带台站的波形记录反演 4 级以上地震矩张量。在此基础上，反演了区域构造应力场的取向及中等主应力相对于最大和最小主应力的比值。研制或改进了有关的软件，并应用于某些地区，探讨了区域应力场的作用与发生过程的关系。

四、震源参数及其应用研究：震源参数研究是该团队研究工作的重点。在小震震源研究方面，对国际上关于小震震源参数测定的方法做出了集成、优化组合和改进，尤其是提出了用 SH 波测定小震震源参数的方法，避免了地震自由表面效应，提高震源参数测定的可靠性，并形成了编制新参数（地震矩 M_0 、矩震级 M_w 、震源特征尺度 r 和地震应力降 $\Delta\sigma$ ）地震目录的技术规范。研制了相应的软件并应用于某些地区。在大量地震参数测定的基础上，研究了地震定标关系，阐明我国大陆地震应力降随震级增大而增大，揭示了大、小地震发生物理过程的差异；在大震震源研究方面，研制或修改了地震矩张量和破裂过程反演的软件，并应用于许多大震的反演，揭示了地震破裂的过程和主要特征。

结合某些中强以上地震震例，开展了 Q 、 $\Delta\sigma$ 和地震活动图像及其他可能性前兆时空演化特征的研究，对孕震可能物理过程作了探讨，取得一些初步的认识。同时基于震源区介质呈明显的各项异性是大震孕育的重要特征，提出了用谱振幅相关分析对前震序列作早期识别的新方法，经后验证明，具有较好的效能。

五、汶川地震专题研究：汶川 8 级地震发生后，团队立即开展了有关的研究，阐明汶川 8 级地震发生的区域地震活动背景和发生过程，尤其是揭示了地震破裂和震区应力场分布的不均匀性特征，指出北东段与西南段破裂机制明显有别，北东段破裂是由于西南段的主破裂所触发的，相应地，北东段和西南段余震衰减特征也明显有别，为震后地震趋势判断提供了某些依据。

六、水库地震研究：“实验室”作为承担正在开展的国家重点科技支撑项目“水库地震监测预测技术研究”任务的主要研究团队之一，将数字地震学研究的有关成果应用于水库诱发地震的研究，取得了一些新的重要认识，尤其值得

指出的是绝大多数发生在距库岸 10km 以内,特别是库岸附近,震源深度在 10km 的范围里,更重要的是水库诱发地震的应力降显著较低。这是水库诱发地震有别于前缘构造地震的重要特征,也是识别水库蓄水后,库区发生的地震是否为水库诱发地震的主要依据。

总之,地震预测研究所的地震图像与数字地震观测资料应用研究实验室研究团队在推进数字化地震观测资料在地震预测中的应用与研究方面取得了较丰硕的成果,他们的工作使我倍感欣慰,我衷心希望,在陈章立研究员的带领下,该团队能在地震预测研究及人才培养方面能更上一层楼。也希望中国地震局各级领导能更加关注该团队的工作,加大对其工作的支持力度,使其更具可持续发展。最后,我衷心祝愿我国的防震减灾事业在机遇与挑战面前,把握时机,依靠科技,依靠法制,走向更加辉煌的未来!

梅世蓉

目 录

汶川地震专辑

汶川 8.0 级地震发生背景与过程的研究

..... 陈章立 赵翠萍 王勤彩 华 卫 周连庆 史海霞 陈翰林(3)

汶川 M_w 8.0 地震震源破裂过程研究

——分段特征 赵翠萍 陈章立 周连庆 李志雄 康英(15)

汶川大地震余震序列震源机制的空间分段特征

..... 王勤彩 陈章立 郑斯华(25)

2008 年汶川 8.0 级地震序列震源参数分段特征的研究

..... 华 卫 陈章立 郑斯华(33)

汶川 8.0 级地震触发与余震活动空间分布研究

..... 华 卫 陈章立 李志雄 赵翠萍 王勤彩(42)

汶川 8.0 级地震序列活动的分段性研究

李志雄 邵志刚 赵翠萍 李圣强 王慧敏 吕梅梅 和 平 刘桂平 崔子键(48)

川滇地区 $M \geq 7$ 地震早期衰减特征与汶川 8.0 级地震强余震预测

..... 付 虹 邬成栋(55)

严重的挫折 重要的启示

——汶川 8.0 级地震引发的对地震预测研究的某些科学思考 陈章立 李志雄(64)

震源参数及应力场研究

1998~2003 年伽师三次不同类型 M_s 6 地震震源破裂过程及短期内余震活动特征

..... 赵翠萍 陈章立 郑斯华(77)

伽师震源区中等强度地震矩张量反演及应力场特征

..... 赵翠萍 陈章立 郑斯华 张智强(88)

基于 MATLAB 的小震震源参数计算软件研制

..... 朱新运 于俊谊(102)

基于 MATLAB 的 S 波分裂软件研制

..... 朱新运 魏红梅 黄世源(111)

用 P 波、S 波初动和振幅比计算中小地震震源机制在云南地区的应用

.....赵小艳 苏有锦 付虹 邬成栋(121)

首都圈中小地震震源参数的精确测定及其中强震前后的变化

.....史海霞 赵翠萍 刘杰(130)

用广义反演方法估算首都圈地区台站场地效应

.....史海霞 修济刚 陈章立 王勤彩 华卫(142)

利用不同方法估算流动台站的场地响应

.....华卫 陈章立 郑斯华(153)

宁洱地震序列的震源机制解分析

.....付虹 王绍晋 龙晓帆 刘丽芳 邬成栋(167)

山东及附近区域部分中小地震震源机制特征分析

.....山长仑 李永红 李霞 颜启 张志慧 李镇军(174)

广东及邻区的应力场反演

.....康英 杨选 陈杏 陈贵美 郑斯华 周连庆 史海霞 陈翰林(180)

阳江地区地震双差定位及其活动图像分析

.....康英 杨选 黄文辉 陈杏 陈贵美 林伟 吴华灯(189)

广东新地震参数目录的编制

.....康英 吕金水 杨选 黄文辉(198)

云南和四川地区中小地震应力降时空特征研究

.....刘丽芳 苏有锦 刘杰 杨晶琼(207)

安徽及邻近地区震源参数反演及分析

.....沈小七 姚大全 陈安国 郑海刚(215)

小震群序列类型判定方法研究的现状及相关问题研究的趋势

.....崔子健 李志雄 陈章立 赵翠萍 周连庆(223)

关于小震群序列类型判定研究的设想及其初步应用

.....崔子健 李志雄 陈章立 赵翠萍 周连庆(233)

判别小震群序列类型的新方法研究

——震源谱振幅相关系数方法

.....崔子健 李志雄 陈章立 赵翠萍 郑斯华 周连庆(242)

介质性质和结构研究

Amplitude Tomography of Lg waves in Xinjiang and Its Adjacent Regions

.....Lianqing Zhou Cuiping Zhao Zhangli Chen Sihua Zheng(257)

川滇地区 Lg 波 Q 值层析成像.....周连庆 赵翠萍 修济刚 陈章立(278)

利用尾波包络线反演方法研究 2003 年大姚地震震中区下方地壳的非均匀结构	王勤彩 陈章立 郑斯华(288)
利用尾波包络线反演方法研究伽师强震群区地壳的非均匀结构	王勤彩 陈章立 Y. Asano 郑斯华 A. Hasegawa(296)
云南地区散射衰减、吸收衰减及尾波衰减的综合研究	王勤彩 陈章立 郑斯华(307)
An inversion of site response and Lg attenuation using Lg waveform	ZHU Xin-yun CHEN Yun-tai(323)
江西九江-瑞昌震区的尾波衰减特征初探	吕 坚 朱新运 高建华 沈小七 汤兰荣 肖建华(337)
鄂尔多斯块体 Lg 尾波衰减及其分布图像	刘红桂 周红晖 啜永清 陈书清 金春华(343)
小江断裂带地震尾波 Q_c 值特征研究	赵小艳 苏有锦(354)
利用天然地震波研究地壳 Q 值的方法和进展	周连庆 赵翠萍 修济刚 陈章立 郑斯华(362)
水库地震研究	
龙滩水库地区 P、S 波和尾波衰减	华 卫 赵翠萍 陈章立 郑斯华(377)
三峡水库地区震源参数特征研究	华 卫 陈章立 郑斯华 晏纯清 周连庆 史海霞 陈翰林(387)
紫坪铺水库地区尾波 Q_c 值研究	周连庆 赵翠萍 陈章立(396)
广西龙滩库区地震剪切波分裂研究	史海霞 赵翠萍(405)
龙滩库区水库地震震源机制及应力场特征研究	陈翰林 赵翠萍 修济刚 陈章立(417)
龙滩水库地震精定位及活动特征研究	陈翰林 赵翠萍 修济刚 陈章立(428)
其他	
强震前地震非均匀度异常与前兆群体异常关系的研究	李志雄 陶本藻 路 鹏 李圣强 泽仁志玛 吴 婷 和 平(443)

岩石非均匀性对地震活动状态影响的数字模拟研究

.....李志雄 陶本藻 焦明若 路 鹏 吴 婷 周连庆 史海霞 陈翰林(459)

震级频度与 $G-R$ 关系式偏离的实验与震例分析

.....李志雄 陶本藻 A.V. Ponomarev 李圣强 和 平 申旭辉(467)

地震视应力在地震预测中的应用

.....刘红桂 王培玲 杨彩霞 徐 戈 孙业军 陈章立 郑斯华(478)

台海两岸地壳相对运动分析

.....李祖宁 刘序俨 吴绍祖 陈 光(489)

云南 $M \geq 5$ 地震震前异常的统计特征

.....付 虹 李永莉 赵小艳 刘丽芳(496)

2007 年 5~6 月滇西南地区 $M \geq 5$ 成组地震活动中、短临异常特征及预测

.....付 虹 王世芹 秦嘉政 邬成栋 苏有锦(504)

云南地震预报认识和进展

.....付 虹 苏有锦 赵小艳 邬成栋(516)

断层面的有限单元模拟方法综述

.....和 平 李志雄 陆远忠 邵志刚(527)

三维有限元数值模拟方法在首都圈地区跨断层水准测量监测能力初步评价中的应用

.....和 平 李志雄 陆远忠 邵志刚(540)

汶川地震专辑

汶川 8.0 级地震发生背景与过程的研究

陈章立^{1), 2)} 赵翠萍²⁾ 王勤彩²⁾ 华 卫²⁾
周连庆²⁾ 史海霞³⁾ 陈翰林²⁾

1) 中国地震局 北京 100036

2) 中国地震局地震预测研究所 北京 100036

3) 中国地震台网中心 北京 100036

摘要 本文首先阐明汶川 8.0 级地震发生在由区域布格重力异常和地震震中分布所确定的武都—松潘—茂汶—汶川—泸定地震带上。8.0 级地震破裂带的主体部分是该地震带所处地震活跃期里缺少了 7 级以上地震的地段。8.0 级地震前出现明显的孕震空区, 8.0 级地震发生在空区周围区域中小地震活动峰值之后的减少段里。8.0 级地震的破裂超出孕震空区范围, 空区内、外余震活动呈现出不同的衰减特征, 依此将余震活动分为 WS 和 NE 两个区段。8.0 级地震破裂过程、4 级以上余震矩张量及震区应力场反演和余震应力降的测定结果表明, 两个区域的位错、余震机制解和应力降及最大主应力的方向等明显有别。根据这些特征和地震应力触发的研究, 推测 NE 段地震的发生可能是由 WS 段主破裂的发生所触发的。

关键词 汶川 8.0 级地震 地震空区 序列衰减 分段性 应力触发

引言

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分在四川省汶川附近 (31.0°N, 103.4°E) 发生 M_s 8.0 地震。余震活动沿龙门山断裂带, 从汶川附近至青州、宁强一带, 长达 330km 左右。汶川 8.0 级地震的发生造成了巨大灾难, 也给地震学界提出了许多值得认真反思、深入研究的科学问题: 为什么在低地震烈度区划区 (Ⅶ度) 的龙门山断裂带发生 8.0 级巨大地震? 汶川 8.0 级地震是否有前兆? 为什么余震区的尺度长达 330km 左右, 呈现超长的特征, 尤其为什么在构造活动性很低的龙门山断裂带的北东段, 余震活动很发育? 等等。面对这类尖锐的科学问题, 汶川 8.0 级地震后, 我们收集、整理了有关的资料, 从不同的角度作了研究。本文是所开展的研究的一部分, 试图综合地震活动的图像、8.0 级地震破裂过程和余震矩张量、震区应力场反演, 以及余震应力降测定与研究成果, 对汶川 8.0 级地震发生的地震活动背景及过程作初步的探讨, 以便从中得到一些有益的启示。

1 汶川 8.0 级地震发生的地震活动背景

龙门山断裂带南始于泸定、天全一带，向北东方向延伸，经汶川，北川至秦岭南的宁强、青川一带，全长约 500km 左右。整个断裂带由后山、中央、前山三条近于相互平行的断裂带组成。汶川 8.0 级地震发生在中央断裂带上。有地震历史记载以来，龙门山断裂带的地震活动水平不高，最大的地震为 1657 年在后山断裂，汶川北发生的 6.5 级地震。汶川 8.0 级地震前已有许多人^[1-6]对龙门山断裂带的构造活动性作了研究，都认为晚第四纪以来龙门山断裂带大致可以北川—安县一线为界分为西南和北东两大段。其中北东段构造活动性很弱，有些人冠之以“不活动断层”，西南段的构造活动性虽然比北东段高些，但晚第四纪以来，断裂带的滑动速率也很低。汶川 8.0 级地震后，张培震等人^[7]的研究也得到同样的结论，指出晚第四纪以来，整个龙门山断裂带的滑动速率不超过 3mm/a，单条断裂的滑动速率不超过 1mm/a。并认为这可能是 8.0 级地震前对龙门山断裂带潜在地震危险性认识严重不足的重要原因。本文后面将对此作简要的评论，这里首先对为什么在龙门山断裂带发生 8.0 级巨大地震的问题作初步探讨。

与板块俯冲带不同，在大陆地区地震震中散布在广阔的地域里，不同走向的震中相对密集带互相穿插，交织成网，形成复杂的格局。我们把震中相对密集带视为地震带，并将具有深部构造背的 $M_s \geq 6.0$ 地震的震中相对密集带作为大陆地区的主要地震带^[8]。图 1 和图 2 分别展示了龙门山断裂带有历史地震记载以来 $M_s \geq 6.0$ 地震和现代地震台网测定的地震震中的分布。可以看出，从武都北沿北北东方向经松潘、平武一带延伸至北川、汶川一带，转向北东向展布，延伸至天全、泸定一带的狭窄地带是历史和现今地震震中的相对密集带。

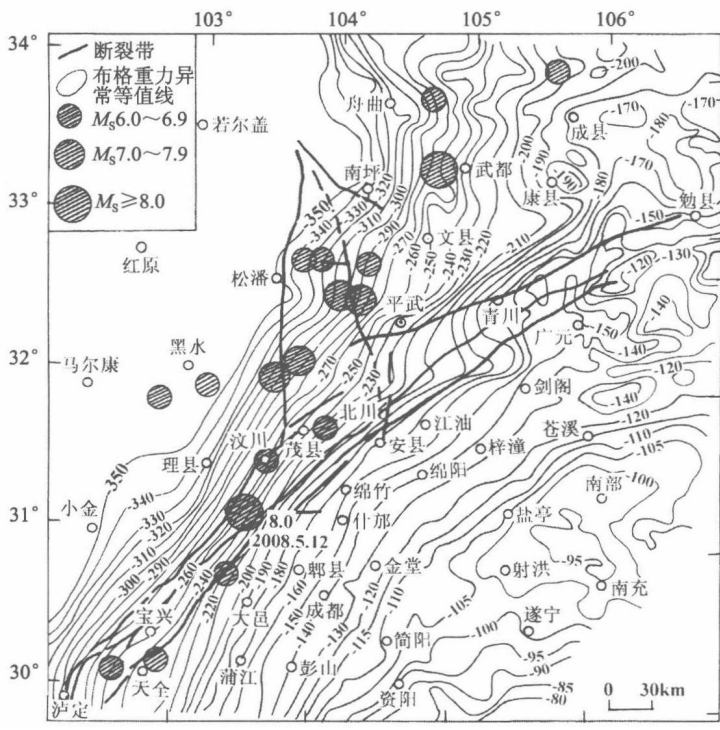


图 1 龙门山断裂带及邻近 $M_s \geq 6.0$ 地震震中及布格重力异常（单位 mGal）分布
（布格重力异常分布引自参考文献[6]）

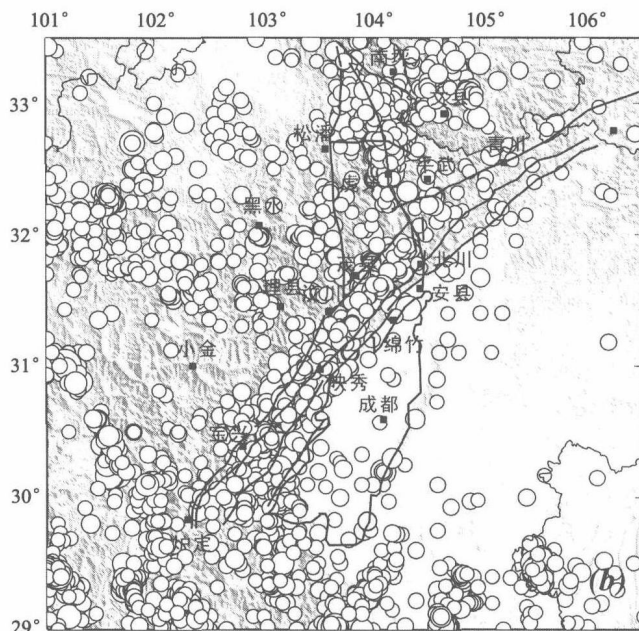


图2 龙门山断裂带及邻区现代地震震中分布

由图1可以看出,该震中相对密集带与反映深部物质结构差异的布格重力异常梯度带的展布基本上相重合。因此,我们将该震中相对密集带视为我国大陆的主要地震带之一。这里需特别注意的是该地震带未包含龙门山断裂带的东北段。图3展示了该地震带1500年以来 $M_S \geq 5\frac{1}{4}$ 地震的时间分布,可以看出,1879年以来,该地震带地震活动处于一个活跃时期。汶川8.0级发生在活跃期里地震带上缺少 $M_S \geq 7.0$ 地震的空段里。

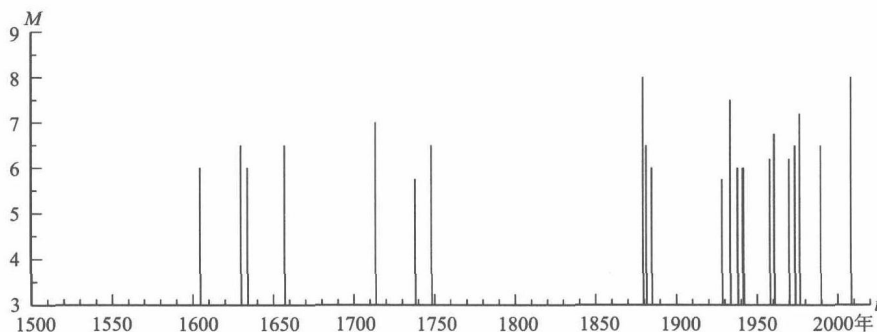


图3 武都北—松潘—汶川—泸定地震带 $M_S \geq 5\frac{1}{4}$ 地震的时间分布

该空段历史上发生过多多次5、6级地震,现代中小地震也较活跃,但从2000年开始,中小地震活动水平显著降低。2002年开始,该空段及两侧近旁区域呈现为 $M_L \geq 4.0$ 地震的空区(图4)(图中未标出折线以外区域的震中)。值得注意的是,在空区内部区域中小地震活动水平显著降低的同时,外围较大区域(图4折线所示的大致为秦岭、鲜水河断裂、龙门山断裂带之间的区域)里,中小地震活动显著增强, $M_L \geq 4.0$ 地震年频度增高。上述异常现象与已有研究^[9]所给出的孕震空区的特征相吻合。根据图5和中国地震台网中心提供的地震目录进一步分析,发现汶川8.0级前一年左右的时间,上述区域里中小地震活动

水平很低。这与梅世蓉^[10] 的研究所指出的大地震往往在空区外围大面积里，地震活动峰值之后减少段里发生的认识一致。

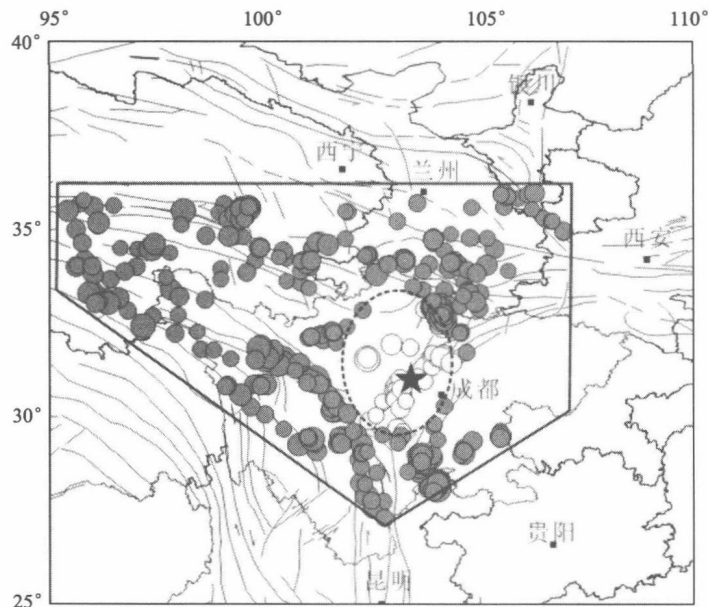


图 4 汶川 8.0 级地震前 $M_L \geq 4.0$ 地震空区图像
○ 1980~2001 ● 2002~2008.5.12
★ 为 8.0 级地震震中，..... 表示研究区域边界

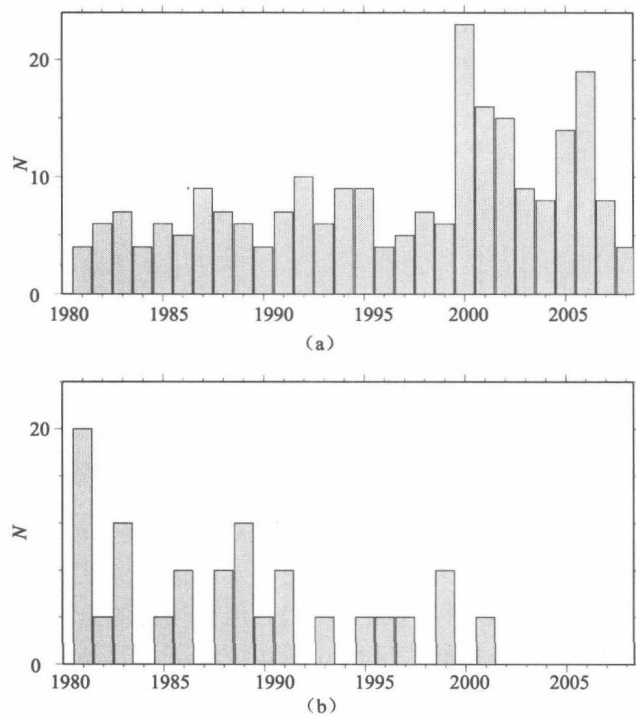


图 5 空区内外区域 $M_L \geq 4.0$ 地震频度的变化
(a) 空区外；(b) 空区内