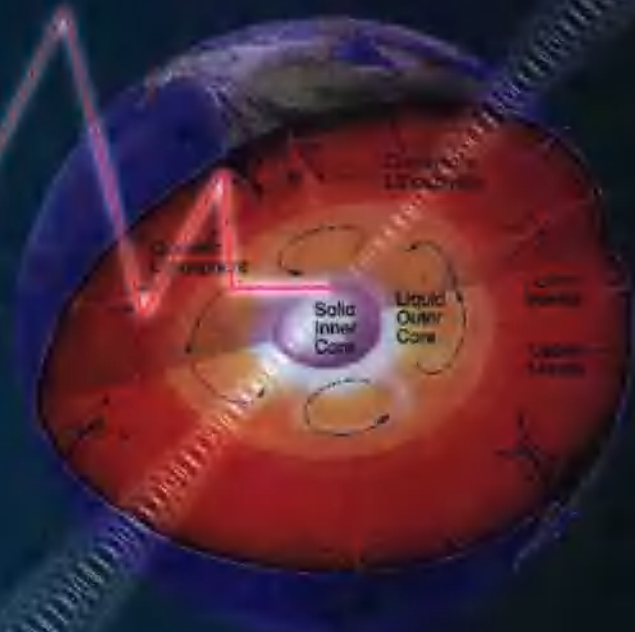




“十五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书

华东地区地震短期预测技术 研究及综合预测专家系统

中国地震局监测预报司



地震出版社

“十五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书

华东地区地震短期预测技术研究 及综合预测专家系统

中国地震局监测预报司



地 震 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

华东地区地震短期预测技术研究及综合预测专家系统/中国地震局监测预报司编. —北京:地震出版社, 2005. 3

ISBN 7-5028-2649-1

I. 华... II. 中... III. ①地震短期预报-研究-华东地区②地震短期预报-专家系统-研究-华东地区 IV. P315.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 012919 号

地震版 XT 200400299

华东地区地震短期预测技术研究及综合预测专家系统

中国地震局监测预报司

责任编辑: 薛广盈

责任校对: 王花芝

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: 北京地大彩印厂

版 (印) 次: 2005 年 4 月第一版 2005 年 4 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 486 千字

印张: 19

印数: 001~500

书号: ISBN 7-5028-2649-1/P·1238 (3278)

定价: 48.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

丛书编委会

主 任：岳明生

副主任：阴朝民 高荣胜

委 员：张晓东 张天中 张永仙 苏有锦 王海涛 蒋海昆
尹京元 刘耀炜 车 时 刘桂萍 李永林 黄蔚北

本书编委会

主 编：蒋海昆 王 炜

编 委：宋治平 冯志声 周翠英 吴耿锋 张伯锋 王锋锋
耿 杰 杨马陵 沈繁奎

序 言

地震预报，尤其短时间尺度的预报作为当代自然科学领域里一个难度很大而富有魅力的前沿课题吸引着一代又一代的地震科技工作者为之奋斗不息。其魅力不仅在于地震孕育、发生的许多奥秘有待我们去揭示，更重要的是在于成功的预报可以使许多国人免遭罹难。自从 1966 年我国正式开展地震预报研究与实践以来，我们既有过不少预报成功的欣慰，也经历了许多遭受挫折的悲痛与沉思。但成功与挫折都给我们以有益的启示，说明地震预报决不是“占星术士”的卜算。在现阶段对某些大地震在震前作出一定程度、乃至较成功的科学预报是有可能的，但要对多数大震作出准确的预报，还需要我们长期坚持不懈、坚忍不拔的努力。在人类历史的长河中，人们对任何复杂事物的认识都有一个从不怎么全面、不怎么深入、不怎么准确到逐渐全面些、深入些的过程。毫无疑问，对认识地震孕育发生过程来说，也是如此。只要认真查阅一下近几个五年计划地震预报攻关研究的成果，必然会得出这样的结论，只要认真研读一下国家“十五”科技攻关项目“强地震短期预测及救灾技术研究”成果，就可以看出，我们的认识又有了新的提升。

“强地震短期预测及救灾技术研究”坚持“研、用”结合的原则，既及时地把研究所得到的新认识应用于地震预报实践，又把预报实践中遇到的新问题、发现的新现象作为攻关研究的重要内容；坚持把普遍性寓于特殊性之中的思想方法，在华北、西南、西北、东南等地区强地震短期前兆特征研究的基础上进行归纳和综合分析，既重视强地震短期前兆的共性表现，又注意不同地质构造之间的差异；坚持在继承基础上的创新，既重视已有研究成果预报经验的应用和常规方法的完善，又立足于创新，通过数值模拟、岩石力学实验和数字化观测资料的应用等，加强强震孕育物理过程和前兆机理及相应的预报新理论、新方法的探索。

从而取得了一批既在科学认识上富有新意，又有重要实用价值的研究成果。所编印、出版的这套丛书正是“十五”攻关的这些阶段性成果的集中体现。它既是广大地震科技工作者集体智慧的结晶，又将为广大地震科技工作者深入的地震预报研究与实践提供新的借鉴与思考。

这套丛书为“十五”期间地震预报攻关研究阶段性成果的总结，既为我们提供了许多新的认识，也为我们留下和提出许多新的问题。这意味着“十五”预报攻关研究的总结是新的深入研究的开始。面对地震灾害的威胁，广大同行一定会继续以严谨的科学态度，扎扎实实的工作作风，坚忍不拔的精神，立志地震预报理论、技术、方法的创新，在未来地震预报实践中谱写新的篇章，铸造成功预报的新的辉煌，更好地服务于国家、造福于人民。

陈章立

2004年9月1日

目 录

绪 论	(1)
-----	-----

上篇 华东地区地震短期预测技术研究

第一章 华东主体地震活动区地震活动构造、应力场背景及地震破裂特征	(9)
1.1 华东地区中强地震的地质构造背景	(9)
1.2 华东地区地震与活动构造的关系	(13)
1.3 华东地区现代构造应力场特征	(17)
1.4 华东现代地震断层的错动性质	(23)
1.5 小结及讨论	(31)
第二章 华东地震活动区地震活动的短期统计特征	(33)
2.1 引言	(33)
2.2 华东地区中强地震前短期阶段地震活动的统计特征	(34)
2.3 华东地区具有短期预测意义的特殊显著性地震事件识别	(46)
2.4 地震加速模型在华东短期地震预测中的应用研究	(60)
2.5 “区域—时间—长度”算法及在中强地震短期预测中的应用研究	(67)
2.6 确定地震破裂特征与环境剪切应力值的误差分析	(83)
第三章 华东地震活动区短期前兆异常特征及预测方法研究	(90)
3.1 形变学科	(91)
3.2 电磁学科	(100)
3.3 流体学科	(110)
3.4 华东地震前兆异常的时空演化特征	(122)
第四章 华东数字化前兆观测资料主要干扰因素、排除方法及高频信息提取的初步研究	(129)
4.1 数字化前兆观测资料的主要干扰因素及其排除方法	(130)
4.2 数字化前兆观测资料的高频处理和分析方法	(175)
第五章 基于构造物理实验研究结果对地震活动性“短期”异常特征的对比研究	(191)
5.1 引言	(191)
5.2 典型断层组合变形过程中 AE 空间分布图像的时间演化与宏观破裂扩展	(194)
5.3 典型断层组合变形过程中声发射活动的时间序列特征	(201)
5.4 典型断层组合模型变形过程中 AE 活动的对比分析及“短期”微破裂特征	(209)

下篇 地震预报专家系统 ESEP 3.0

第六章 ESEP 3.0 系统的组成与特点	(215)
第七章 知识表示与知识库	(220)
7.1 知识构成	(220)
7.2 结构知识及其表示	(220)
7.3 地震学及前兆预报知识与“规则/框架”知识表示方法	(221)
7.4 学习知识表示方法	(222)
7.5 综合预报知识表示方法	(224)
7.6 确定异常证据可信度模型及其“类框架”知识表示方法	(225)
7.7 支持知识表示	(227)
7.8 地震预报知识的获取与知识库建立	(228)
第八章 驾驭式推理与推理机	(230)
8.1 调度	(230)
8.2 推理机	(234)
第九章 解释系统	(253)
9.1 事后解释	(253)
9.2 个性化解释	(254)
9.3 同步解释	(259)
9.4 深层解释	(260)
第十章 机器学习、知识获取及震例检验	(261)
10.1 模糊联想记忆(FAM)神经网络模型	(261)
10.2 FAM 规则的自动生成	(265)
10.3 FAM 神经网络模型在 ESEP 3.0 中的应用	(268)
10.4 径向基函数(RBF)神经网络模型	(275)
10.5 实际震例与资料的检验	(280)
参考文献	(284)

绪 论^①

经过 30 多年的地震预测实践及理论上的艰苦探索,中国地震预报逐步形成了时间上“长、中、短、临”的渐近式预报思路和空间上“场源结合、以场索源”的分析方法。在 20 世纪 80 年代所开展的“六五”和“七五”攻关,对已积累的震例及观测资料进行了系统研究,对各类地震前兆进行了系统清理、确认,基于当时的科学认识,对各种地震预测方法进行了实用化研究,基于已有震例的经验总结,初步建立了地震分析预报指南(国家地震局科技监测司编,1989a、b,1990),研制了相关的实用化软件程序,使日常地震预报工作向规范化迈进了一步,同时还开展了地震前兆观测台网的技术改造和地震预报技术系统的建设。在“六五”、“七五”地震前兆和预报方法清理和实用化研究的工作基础上,“八五”主要开展地震预测方法、地震预报理论的深入攻关研究,对地震孕育过程和不同阶段的前兆表现有了更深入的了解和认识,重点研究了判断不同孕震阶段的判据、指标和方法,形成了更为成熟的地震预报方法和工作程序(中国地震局预测预防司,1998)。在震源孕育环境和震源细结构的深部地球物理探测、数字化地震观测和数字化地震前兆观测仪器的研制与开发、大陆板内地震孕育过程和前兆机理的实验和理论研究等方面取得了一定进展。“九五”攻关的研究重点,放在 1 年尺度的中短期预测方法及其理论研究,旨在提高 1 年尺度的地震中短期预测水平,同时加强 1~3 年中长期预报方法和理论的研究。经过 5 年的努力,中国地震大陆年度中期预测水平有了一定提高,在 1 年尺度中短期前兆异常识别、动态图像演化、强震孕育的物理机理及强震孕育模式研究等方面取得积极进展(中国地震局预测预报司编,2002a、b、c;陆远忠等,2001)。

在历次攻关研究基础上开展的“十五”地震预报科技攻关计划前 3 年的研究内容,总体思路延续以往历次攻关研究在科学认识上逐步深化的理念,同时突出两个重点,一是在时间预测尺度上强调“短期”(3~6 个月),与“九五”1 年尺度地震预报攻关研究相衔接,明显针对日常地震监测预报工作中的突出难点;二是强调区域特征,历次攻关及其它大量研究结果显示,地震活动及其“前兆”表现具有明显的区域特征。究其原因,可能与区域构造、断层活动程度、应力场特征、以及它们之间的相互作用等因素有关,由此可能导致孕震过程、地震活动特点及前兆表现形式的差异。在强调地震活动及其前兆表现区域性特性方面,在以往系统的科学研究计划、攻关课题计划中尚未有过。

根据 2001BA601B01 课题的计划安排,2001BA601B0104 专题主要开展“东南地区强地震短期前兆特征及预测方法研究”。东南地区是中国大陆人口最为密集、经济最为发达的区域,一旦发生破坏性地震,所造成的人员伤亡和财产损失将十分巨大。因而,对较准确的地震短期预测的社会需求十分强烈。东南地震活动区历史上曾是地震活动及地震灾害较为严重的地区,著名的郯庐大断裂由北至南贯穿该区域,历史上曾发生过多次破坏性地震,中国东部最大的地震 1668 年郯城 8½ 级地震即发生于该区。近几年来,苏鲁交界—南黄海又连续

^① 蒋海昆执笔。

被中国地震局确定为地震危险区或注意加强监视地区，面临着严峻的地震形势。

东南地震活动区地震构造、地震活动及其动力来源与中国大陆其它区域具有较大差异。构造活动以左旋走滑逆断层活动为主，现今地震活动以中强地震活动为主，强震较少。东南地震活动区还是我国海域地震的主要活动场所。自1970年有较完整地震记录以来已积累5级以上地震震例30余次，其中内陆地震17次。东南地区地震序列类型多数为“孤立型”或“主-余型”，但余震活动不甚发育。东南地区中强以上地震活动空间分布不均匀程度较高，在其北部内陆主要分布于山东、江苏及安徽地区，海域地震活动更为强烈，主要分布在苏鲁交界以东的南黄海南、北凹陷区域；在其南部，中强地震主要分布于闽粤交界及附近海域地区。

从地震预测方法来看，地震活动性分析及地球物理和地球化学前兆观测，是地震预测最为重要、应用最为广泛的手段和方法。地震活动性分析主要分为空间异常图像识别及参数的时间变化分析两部分。异常地震活动图像对中强地震的空间位置具有一定的指示意义，对中长期时间预测也有一定估计。部分经典地震学参数具有明确的物理意义，其变化对发震时间具有一定的预测能力，通过参数的空间滑动扫描，亦可在一定程度找寻主地震可能发生区域。地震活动性“异常”常常表现出一些共性的特征。但由于孕震环境条件的极端复杂性、中小地震活动的随机性以及先存构造强烈的控制作用，地震活动图像及地震参数方法都存在大量的虚、漏报问题，尽管给出种种统计检验方法，但似乎并未有明显改善。

如前所述，许多研究结果显示，地震活动及其“前兆”表现具有明显的区域特征，而最明显的区域差异又主要体现在构造特征、断层活动性、应力场特征等方面。从以往的研究工作来看，在强调大范围时空扫描、寻找震前共性特征并取得诸多进展的同时，可能在一定程度上忽略了中强地震及其孕育环境（构造及力学环境）的个性差异。理论及实验研究表明，这种由于构造和力学条件不同而导致的差异在临近失稳的短期阶段表现得更为复杂、多样。在中短期阶段，特别是中期向短期的过渡阶段，地震地球物理及地球化学前兆丰富，但其变化又具有多样性、复杂性。从观测的角度来看，所涉及的领域非常广阔，包括形变、地下流体及电磁三大学科数十种观测手段及观测项目。经过30多年的预测实践，在模拟观测的基础上，东南、特别是华东地区积累了一大批前兆观测资料及与地震相关的前兆异常资料。自“九五”以来，随着前兆观测数字化改造的积极推进，华东各省先后有一大批高采样率的前兆观测资料源源不断地产出，至今已积累了3年多的资料，这为地震短期预测提供了新的观测基础，同时也带来了新的研究任务。

根据课题安排，2001BA601B0104 专题共下达研究经费90万元（人民币），分解为四个子专题：

(1) 2001BA601B010401：华东地区地震学短期预测方法研究

负责人：蒋海昆

主要完成人：周翠英、王铮铮、周焕鹏、侯海峰、冯志军

(2) 2001BA601B010402：华东地区前兆短期预测及数字化前兆观测资料数据处理和分析方法研究

负责人：宋治平、冯志生

主要完成人：耿杰、马钦忠、王梅、宋先月

(3) 2001BA601B010403：华南地区地震学和前兆短期预测方法研究

负责人：杨马陵、沈繁奎

主要完成人：吴时平、林树、丁学仁、华卫

(4) 2001BA601B010404：华东南地区地震短期预测新方法 & 综合预报专家系统研究

负责人：王炜

主要完成人：刘文龙、吴耿峰、徐永林、张博锋、章纯

据不完全统计，除上述主要完成人外，尚有 11 个单位、50 余人参加了 2001BA601B0104 专题的研究工作。从职称分布来看，研究员（含教授）12 人、副研究员（含副教授及高级工程师）21 人，其他为中、初级研究人员；从学历分布来看，博士 6 人、硕士 9 人，其他大多为大学本科学历。

经过两年多的努力，围绕任务书及考核目标要求，2001BA601B0104 专题圆满完成了各项研究任务，所有四个子专题均通过中国地震局组织的验收，在多个方面取得具有一定创新意义的新成果。截至 2003 年 8 月底，2001BA601B0104 专题（标注为第一经费资助来源）已发表论文 30 篇，其中地学核心期刊 20 余篇，SCI 收录 1 篇，已定稿待刊 9 篇。

2001BA601B0104 专题取得以下主要研究成果：

(1) 根据前人关于构造的系统研究，以及以往历次攻关的震例研究结果，对华东地区 1970 年以来所有 5 级以上地震进行系统清理，着重于其区域及发震构造特征、区域及震源区应力场特征、以及破裂机制特征等的综合分析；研究中强以上地震与构造的关系，着重地震强度与构造规模、构造运动方式之间可能的关系分析；根据上述研究结果对震例进行粗略的分类统计研究。

(2) 对华东地区中强以上地震进行系统清理，特别着重于短期阶段（3 个月）地震学异常时空演化的共性特征及中期向短期过渡的判别标志研究。在前人的工作基础上，通过图像分析初步归纳华东地区短期阶段可能的异常图像显示；通过相互独立参数（组合）的时空扫描，找寻中期向短期过渡可能的识别标志。

(3) 针对华东地区短期阶段地震活动特点，开展新的地震短期预测统计方法研究。主要包括以下内容：

① 研究华东地区具有前兆意义的特殊显著性地震事件的识别方法，在活动图像及活动性分析方法初步筛选的基础上，通过有关地震波参数的计算，探寻具有前兆意义的特殊显著性地震事件与普通地震之间的差异及其可能的判别标志。

② 以构造作为基本的参数统计单元，在华东地区按统一规则确定 49 条断裂和 7 个构造块体作为统计单元，选用频次类、能量类、调制类等地震活动参数，对断裂取不同宽度，进行地震目录资料的扫描和比较，以此确定彼此基本上相互独立、对地震样本数无明显要求、映震效果较好的活动性参数及基于构造的地震目录取样范围。系统研究了华东地区中强地震震例的全时程扫描结果，在一定程度上对该方法所得到的短期特征及中期向短期过渡可能的识别标志等进行了初步探索。

③ 以华东地区中强地震为例，将地震加速模型尝试应用于地震短期预测。以模型外推拟合方差的极小值来确定最优模型参数，并据此进行外推计算，加速模型拟合方差极小值对应的时间，即可能的主震的预测时间。

④ 引入并改进 RTL 算法，较之原来的定义更加强调了地震破裂尺度函数对 RTL 的贡献，同时保证震中距函数、时间函数及破裂尺度函数对 RTL 影响的权系数相等。对华东地

区中强以上地震震例进行了系统研究,初步归纳出针对震中地区进行短期预测的指标、方法及模型最佳参数选择,进而对通过大范围内 RTL 空间扫描结果进行地点识别等问题进行了较深入的讨论。

⑤形变、流体、电磁三大学科系统研究了华东地区前兆短期异常特征及中期向短期过渡的判别。以不同的台、点观测资料异常及其映震特点的统计分析为主线,对单项异常及群体异常的短期或中短期演化特征进行了较系统的总结和提炼。

⑥形变、流体、电磁三大学科系统开展了数字化前兆资料正常场、主要干扰因素、变化形态以及干扰排除方法的研究,通过数字化前兆资料与模拟资料之间变化趋势的一致性、均值一致性、方差一致性以及资料的长期稳定性等进行系统的检验,开展了固体潮内精度对比分析及 γ 因子计算,进而初步给出对各学科数字化资料的粗略评价,给出各学科数字化前兆观测主要的干扰因素及排除方法。

⑦开展了数字化前兆资料高频信息提取新方法的研究。给出多种针对数字化前兆观测资料的前兆处理新方法,诸如大地电场多极矩对比分析,水位对固体潮和气压响应时间滞后校正,适合中国观测实际并利用数字化地磁资料计算 K 指数的 FMI-H 方法,小波变换对数字化前兆资料中高频与低频信息的分离、趋势或高频变化的消除、高频或短期异常的提取等数字前兆资料处理方法。

⑧结合构造物理实验及理论研究结果,研究典型构造组合动力学失稳前短期阶段(以峰后弱化阶段相比拟)微破裂的短期特征及中期向短期过渡(峰值前后,强化阶段向弱化阶段的转折,线弹性变形阶段向扩容或位移弱化阶段的转折)的识别标志,并对其可能的物理机制进行初步探讨。这里一方面考虑几种典型的构造组合作为变形主体,另一方面考虑了时间上的“短期”或“中期”等概念。但需要说明的是,构造物理实验工作中所谓的“短期”或“中期”并不是一个绝对的时间概念,而是岩石变形过程中的一个状态过程,其绝对时间的长短与加载速率及岩体的抗压或抗剪强度等因素有关。这一研究的主要作用在于,对实际的地震短期预测可能有所启示,同时有利于对地震孕育过程中地震活动性前兆现象物理机理的认识。

⑨开发完成地震预报专家系统 ESEP3.0。该系统是目前国内外第一个具有驾驭式解释能力和机器学习功能的第三代地震预报专家系统。驾驭式解释功能的实现,使用户在推理过程中不再处于被动地位;系统提供了事后解释、个性化解释、同步解释和双向解释等四种形式的解释功能;针对地震预报知识的特点,对知识表示进行了改进,使知识属性具有模糊集、权值以及规则匹配阈值等内容,同时推理机也具有了模糊匹配的功能;系统使用模糊联想记忆 FAM 模型,将神经网络具有良好的学习功能和模糊系统具有良好的知识表达功能很好地结合起来,使系统具有较强的机器学习功能;系统建成了地震异常震例库,并通过对震例库的学习得到一些有益的知识;系统吸收了“九五”、“十五”的攻关研究成果,对知识库进行了进一步充实;针对地震预报的特点,提出了前兆台项密度改正和异常证据的相关改正方法;使用 RBF 神经网络,克服了 BP 神经网络过分依赖初值及其可能局部收敛的缺点;实现了与地震分析预报系统 MapSis 的连接。利用地震预报专家系统 ESEP 3.0,系统地开展了实际震例的回顾性检验。

根据专题研究内容,本书分上、下两篇,上篇以华东地区地震短期预测及数字化前兆资料研究等内容为主,下篇以专家系统为主。

在专题及子专题研究过程中，得到梅世蓉研究员、张国民研究员、罗兰格研究员、高旭研究员、傅征祥研究员、韩渭宾研究员、陆远忠研究员以及课题负责人张晓东研究员的指导，他们提出建设性的建议及对报告的修改意见，为本专题的顺利完成提供了重要保证。

中国地震局监测预报司车时处长、刘桂萍副处长及李永林等给予诸多指导与关注。山东省地震局、上海市地震局、广东省地震局及东南地区各省地震局的科研管理部门及地震预报研究中心为本专题的顺利实施，提供了良好的物质条件及人力资源保障。

上 篇

华东地区地震短期预测技术研究

第一章 华东主体地震活动区地震活动构造、 应力场背景及地震破裂特征^①

1.1 华东地区中强地震的地质构造背景

1.1.1 华东地区地震的空间分布特点

根据地质构造特点和中、强地震的分布情况,华东研究区大致确定为 $30^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 范围。依据《中国历史强震目录》(国家地震局震害防御司, 1995)、《中国近代地震目录》(中国地震局震害防御司, 1999) 提供的 5 级以上历史地震统计(剔除余震和邢台地震), 自公元前 280 年至今, 华东研究区共发生 $M_s\geq 5$ 级地震 123 次(组), 其中 6~6.9 级地震 31 次, $M_s\geq 7$ 级地震 5 次, 最大为 1668 年郯城 8 $\frac{1}{2}$ 级巨大地震。依据中国地震局地震数据中心提供的现代地震目录统计, 1970 年以来该区共发生 $M_L\geq 5$ 级地震 24 组(次), 其中 $M_L\geq 6.0$ 级地震仅 3 次, 最大为 1996 年长江口东 $M_L 6.4$ 级地震(图 1.1)。由

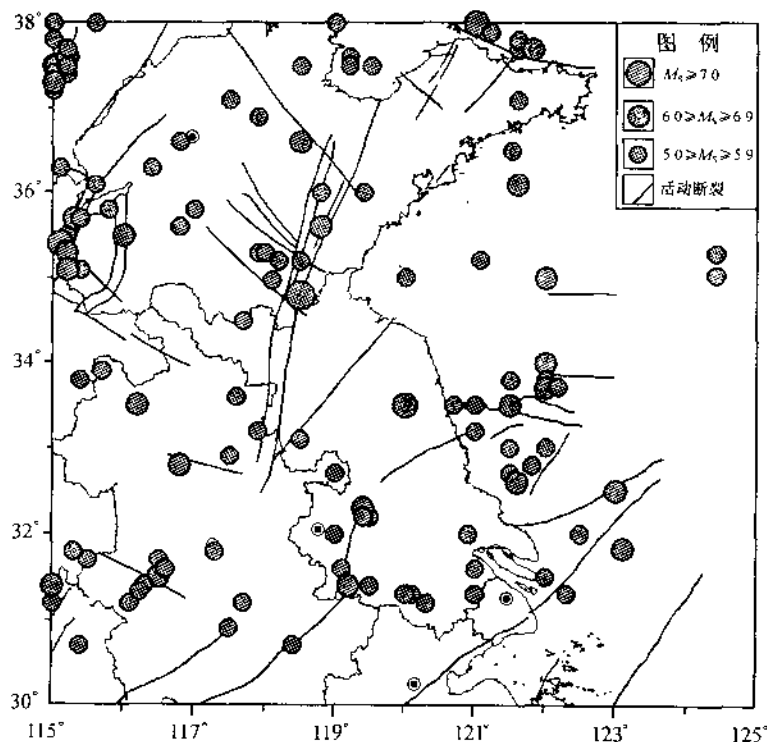


图 1.1 华东研究区范围及历史 ($M_s\geq 5$) 地震分布

① 周翠英、蒋海昆、王铮铮执笔。