

Active Fault Exploration in Urban Areas—Method and Practice

城市活动断层探测方法与实践

宋新初 周本刚 杨晓平等 编著

地震出版社

Active Fault Exploration in Urban Areas—Method and Practice

城市活动断层探测方法与实践

宋新初 周本刚 杨晓平等 编著



地震出版社

图书在版编目(CIP)数据

城市活动断层探测方法与实践 / 宋新初等编著.

— 北京: 地震出版社, 2014. 12

ISBN 978-7-5028-4493-6

I. ①城… II. ①宋… III. ①城市—活动断层—探测—

宁波市 IV. ①P548.255.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 269787 号

地震版 XM2160

城市活动断层探测方法与实践

宋新初 周本刚 杨晓平等 编著

责任编辑: 江 楚

责任校对: 刘 丽

出版发行: 地震出版社

北京市海淀区民族大学南路9号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

专业部: 68467982 68721991

<http://www.dzpress.com.cn>

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 68455221

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大天成印务有限公司

版(印)次: 2014年12月第一版 2014年12月第一次印刷

开本: 889×1194 1/16

字数: 483千字

印张: 26.5 插页: 4

印数: 0001~1500

书号: ISBN 978-7-5028-4493-6/P (5184)

定价: 168.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

科学顾问：邓起东

主 编：宋新初

副 主 编：周本刚 杨晓平

编 著 者：（按姓氏拼音排序）

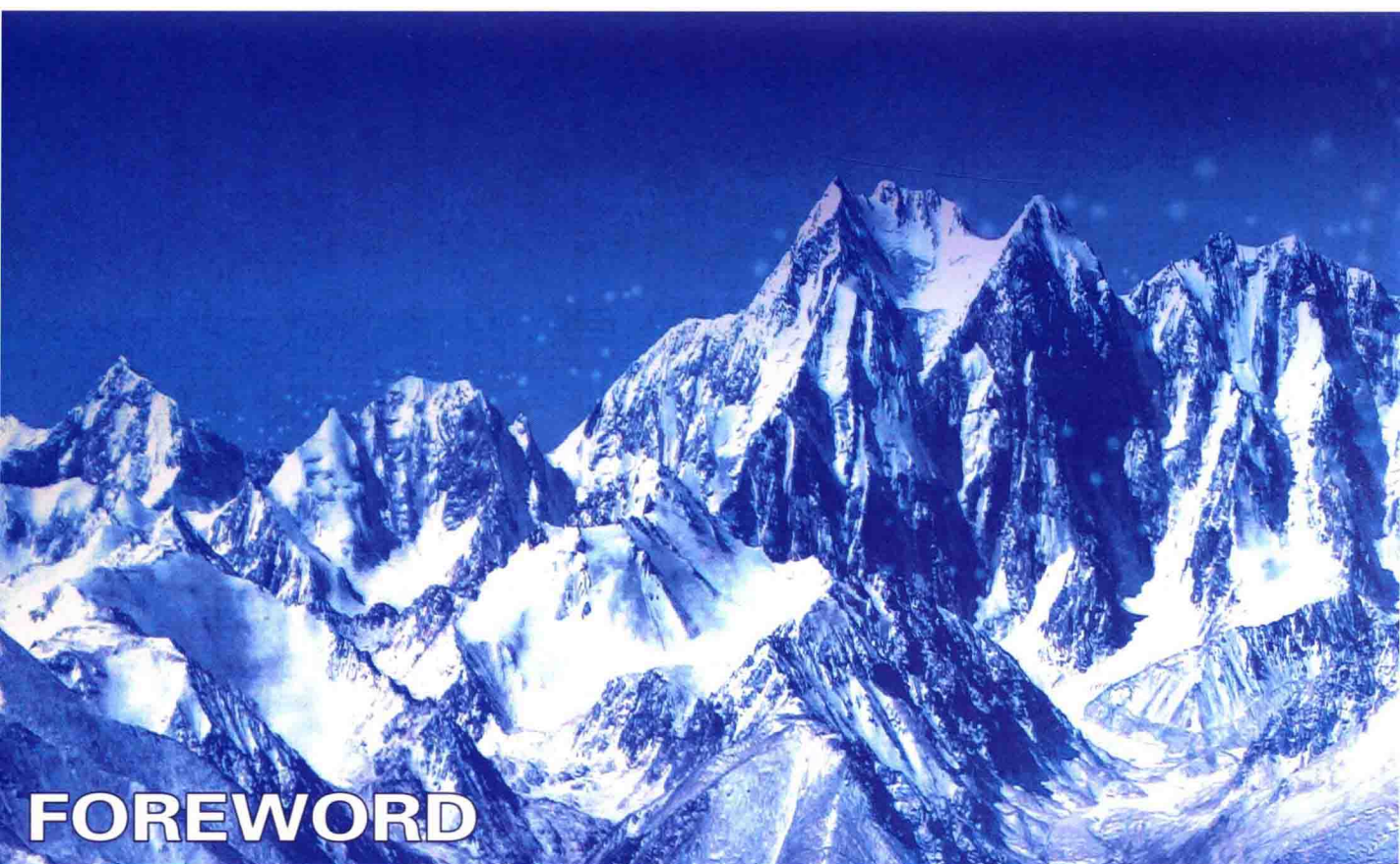
安艳芬 陈树岩 韩用兵 韩竹军

侯林锋 刘保金 吕红山 马志江

冉洪流 宋方敏 宋新初 杨晓平

尹功明 俞言祥 袁洪克 詹 艳

赵伯明 周本刚



前言



(一)

伏羲开天辟地，老子三生万物，易经两仪生四象，皆演绎自然、社会变化之规律。在地球演变历史中，任何一次造山运动都改天换地，沧海变桑田，演化出五洋七洲、岛屿湖泊、山川盆地等迷人景象。板块运动改变陆海轮廓，圣安德烈斯断层、马里亚纳海沟、洋脊扩张断裂等都是板块运动鬼斧神工的杰作。地幔热环境蕴育地壳应力应变，小至岩块大到板块，或褶皱或节理或断层或破碎带。形变、能量积累，断层破裂释放能量，直接导致地表或断层或褶皱或节理等地质痕迹。正是通过这些痕迹才有了人类对地球的认知和探索。

马克思的人化自然观，从社会、实践、发展的观点论述了人、人类社会与自然的关系。人类改造自然和推动经济社会发展，灾害往往相生相伴。中华民族 5000 年风雨历程，历经无数天灾之害、人祸之虞。21 世纪以来更是自然灾害频发，无情摧毁着人类的生存环境，贪婪吞噬着人类的生命财产。人类要生存，社会要发展，就要不断与自然灾害作斗争，吸取教训，探索灾害孕育、发生、发展、演变之规律，或防或治，减少损失，保护生命。

地震，群灾之首，皆因它的突发性和巨大破坏力。1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级大地震，一个百万人口的城市和工业基础毁于一旦。2004 年 12 月 26 日印度尼西亚苏门答腊 8.7 级地震及其引起的海啸造成了举世震惊的灾难等等，这些毁灭性灾难都将永久留在人类灾难史中。恩格斯说过：“没有哪一次巨大的历史灾难不是以历史的进步为补偿的。”而每一次地震灾难都激励无数有识之士奋勇探索、负重前行。

(二)

人类的迁徙、城市的形成，皆因防御固邦、物产丰盛、交通便利，弗灾害因子。城市经济发达、人口密集、建构物集中，又承载着政治和社会责任，因此一旦发生城市直下型强震，损失巨大，后果不堪设想。“经起于秋毫之末，挥之于泰山之本。”行百年大计，先行地下清楚，国之策也。活动构造探查乃震害防御之基础，城市直下型活动断层探测更是基础之根柢。

地震活动构造，乃第四纪晚更新世以来发生过活动或现在正在活动或未来仍有可能发生活动的构造。大地震与活动构造密切相关，我国绝大部分 6 级以上地震都发生在活动构造带上。大量震例表明，活动断层不仅是产生强烈地震之根源，且其地表破裂或强变形带及其附近更是建筑物破坏最严重、人员伤亡最集中的地带。例如，1906 年 4 月 18 日美国旧金山 8.1 级地震沿直下型圣安德烈斯断层发生，同震水平位错高达 6.1m，致旧金山市遭受毁灭性打击；1995 年 1 月 17 日日本阪神 7.2 级地震，伤亡人员十之八九集中在发震断层两侧 2 ~ 3 千米范围内；1999 年 9 月 21 日台湾地区集集 7.6 级地震，沿车笼埔发震断层几乎所有建筑夷为平地；2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震造成沿龙门山中央断裂的北川县城被彻底摧毁，无奈迁建。面对巨大灾害与损失，有关国家纷纷加强城市直下型活动断层探测与地震危险性评价工作。

自 20 世纪 80 年代，活动构造研究突飞猛进，从定性进入定量研究，初步形成了以定位、几何学、结构特征、活动年龄、运动参数、古地震和大地震重复间隔及深部构造背景等为主要内容的现代活动构造学。现代活动构造学的进展使得精确定位城市直下型断层、分析其活动与危险性、寻找防灾对策成为可能。20 世纪 90 年代以来，美国在洛杉矶地区实施 LARSE 计划，通过多点和多剖面人工地震探测，查明洛杉矶盆地地下可能发生大地震的隐伏活动断层和直下型地震的震源构造；日本城市密集平原区实施综合地球物理探测计划，利用地震反射、折射、地脉动台阵、钻探和测井等技术综合探查盆地及平原的地质结构与构造。这些计划为城市防灾减灾对策提供了不可或缺的支撑。

“善为政者，防于未然”，我国政府高度重视城市活断层探测工作。21 世纪伊始，中央领导曾指出“要注意避开地震危险区和地震活动断层”，并强调“科学规划城市建设，保证城市安全、抗御地震灾害迫在眉睫。首先要加强探明城市地下活动断层的分布及其危险性评估工作”。为此，在 20 世纪 90 年代上海、天津和福州城市活动断层探测与地震危险性评价试点工作基础上，中国地震局推出在我国 20 个城市实施“城市活动断层探测与地震危险性评价”计划，并获国家发展和改革委员会批准。中国地震局及时制定了《中国地震活动断层探测技术系统技术规程（JSGC—04）》，明确标准与要求，因地制宜制定防震减灾对策。

(三)

宁波，古曰“甬”，春秋“越地”，秦“会稽郡”。历史文化积淀浓厚，为 7000 年历史的“河姆渡文化”发祥地。宁波人文荟萃，经贸发达，孙中山先生曰：“凡吾国各埠，莫不有甬人事业”“其影响力之大，固可首居一指者也”。今宁波是我国东部沿海重要港口城市和长江三角洲南翼经济中心。

宁波地区大地构造位于华南褶皱系浙东南隆起区东北部，印支运动形成了系列复式褶皱和逆冲断裂的主体地质构架，但侏罗纪火山岩、白垩纪沉积岩大面积覆盖。燕山早期构造运动相对稳定，而后加剧，受北东、东西向构造控制，裂隙式大规模火山喷发频繁，岩浆侵入活跃。喜山期受东南沿海大陆边缘活动带影响，玄武岩喷溢。新构造运动呈间歇性缓慢隆起，地貌特点是阶地、冲沟发育，河流改道不乏其例，侵蚀剥蚀堆积颇具规律。第四纪以来区内存有活动的宁波盆地和大碛盆地。地震构造位于华北地震带南缘，区内中小震时有发生，具有中强地震背景。公元 393 年至 1921 年文献记载有感地震 60 余次，其中 1523 年镇海 5½ 级地震，《明实录》曰：“嘉靖二年七月壬申，浙江定海等卫奏，空中有声如雷，风雨骤作，地大震，城堞尽毁。”《罪惟录》记载“七月定海等处大震，空中声若雷，城堞尽毁。”仪器记录以来，1994 年皎口水库发生最大地震为 4.7 级的震群，万人惶恐逃离，间接致亡 3 人。

“圣人深虑天下，莫贵于生”，宁波市政府坚持以民生为本的防灾思想，根据宁波城市发展需要，从 2002 年起启动“宁波市活动断层探测与地震危险性评价”项目，并成为《中国地震活断层探测技术系统》20 个子项目之一。就城市隐伏断层探测与研究而言，难在建筑密集、人畜众多、喧闹声大、干扰背景高，尤我国东部地区因断层活动强度偏弱、人类环境改造剧烈，探测研究更为困难。为此，困知勉行，集思广益，围绕详细探明主要断层位置、活动性，判定断层地震危险性、危害性，提出灾害防御对策之中心任务，利用现代活动构造学研究方法和活动断层探测之规程，按照“抓住重点、兼顾一般，由浅入深、先粗后细”的工作原则，确定“宏观入手、微观求证、精细施工、稳步推进”的实施策略。通过对区内 15 条主要断层开展遥感资料解译、地球化学、浅层人工地震、地质地貌、槽探和钻孔联合地质剖面等探测、调查，建立了宁波盆地新的第四纪标准地层剖面，更新了以往对盆地地区第四纪地层的认识；确定了 15 条主要断层的活动性、危

险性以及育王山山前断层几何结构、埋藏深度、最新活动准确位置、活动强度和第四纪以来的时空演化历史；得出了育王山山前断层最大潜在地震震级、复发间隔与强地震动危害性、地表潜在变形带的范围、变形量分布，提出了防灾减灾对策与建议。

(四)

科学元典是科学进一步发展的灯塔和坐标，科学发展是众多科学研究和实践的累积，每一个学科的成长均是长期站在前人基础上的点滴进步。编撰此书，一则是将宁波市活动断层探测与研究心得、体会和读者交流；二则是将该项目采用的“高质量地质地貌填图、高分辨率浅层地震勘探和高密度钻孔联合探测剖面”的精细综合探测方法，以及中国东部弱活动张性盆地边界断层最新活动迁移特征、中国东部弱构造活动区隐伏活动断层鉴定标志等新思路与认识介绍给大家，也为活动断层探测研究提供一些基础史实；三是把工作实践中所学到的活动断层探测的有关基本概念、基本理论和基本方法系统地总结出来，把一些基础但十分重要的知识呈览给大家，以期对正在从事或将要从事相关领域工作的研究者提供点滴参考和帮助，使我国活动断层探测与防灾减灾工作在广大研究者的共同努力下，不断地向前发展。

初文瑕瑜兼有，承蒙邓起东院士厚爱，字斟句酌、亲笔修改，叩谢！

本书如能为您有所裨益，谨致谢忱。吾等水平所限，难免有疏漏和不妥之处，敬请批评指正。

宋新初

2014 年 1 月



目 录

第一篇 活动断层探测的基本概念与方法	1
第一章 城市活动断层与地震	2
第一节 活动构造的概念与类型	3
一、活动构造的概念.....	3
二、活动构造的类型.....	4
第二节 中国活动断层与地震	7
一、中国活动断层的类型与分布.....	7
二、中国活动断层与地震的关系.....	11
第三节 城市活动断层与直下型地震	12
一、城市活动断层与直下型地震的危害.....	12
二、关于直下型地震的反思与对策.....	15
三、城市活动断层探测目标.....	17
四、城市活动断层的研究进展.....	18
第二章 城市活动断层探测方法	20
第一节 活动断层探测方法概述	20
第二节 遥感资料解译与地质地貌调查	23
一、遥感图像分析.....	23
二、地质地貌调查.....	29
第三节 隐伏断层探测	41
一、地球化学探测.....	41
二、浅层地震勘探.....	43

三、钻孔联合地质剖面探测.....	61
第四节 深部构造环境探测	67
一、深地震反射探测.....	67
二、深地震宽角反射 / 折射探测	68
三、大地电磁探测.....	69
第五节 弱活动断层探测问题	73
一、弱活动断层宏观位置的识别.....	74
二、弱活动断层的浅层地震探测.....	77
三、弱活动断层的钻孔联合地质剖面探测上断点的判别问题.....	81
第三章 活动断层地震危险性和危害性评价方法.....	83
第一节 活动断层地震危险性评价	83
一、强震区活动断层地震危险性评价方法.....	84
二、弱活动断层地震危险性评价方法.....	99
三、断层地震危险性评价中值得注意的问题.....	103
第二节 强地面运动评价	105
一、强地面运动预测方法.....	106
二、有限断层震源模型.....	113
三、地下速度结构模型.....	115
第三节 地震地表强变形带预测	123
一、概 述.....	123
二、预测方法.....	124
三、多层介质条件下地表变形带规模预测.....	126
第四节 地脉动观测在地下速度结构建模中的应用	130
一、地脉动的概念和利用条件.....	130
二、地脉动的应用方法.....	131
三、关于单点谱比法.....	132

四、地脉动观测.....	134
五、地脉动解析.....	135
主要参考文献.....	139
第二篇 宁波市活动断层探测.....	149
第四章 宁波市及邻区地震构造特征.....	150
第一节 地质构造及其活动性.....	150
一、大地构造背景.....	150
二、新构造运动特征.....	151
三、地壳形变.....	154
四、主要断层的活动性.....	157
第二节 地球物理场与地壳结构.....	162
一、重力场特征.....	162
二、航磁场特征.....	163
三、地壳结构与深部构造.....	164
第三节 地震活动与构造应力场.....	167
一、空间分布特征.....	167
二、时间分布特征.....	168
三、震源机制解.....	170
第四节 地震构造分析.....	176
一、主要震例的构造背景分析.....	176
二、地震构造基本特征.....	177
第五章 宁波盆地和大碛盆地第四纪沉积环境.....	179
第一节 宁波地区第四系研究概述.....	179
第二节 宁波盆地第四系及沉积环境.....	180

一、钻孔位置.....	180
二、钻孔岩芯特征.....	180
三、钻孔孢粉分析.....	184
四、钻孔岩芯的海侵地层分析.....	191
五、钻孔中第一硬土层成因及年代.....	193
六、钻孔岩芯年代学研究.....	195
第三节 大碛盆地第四系及沉积环境.....	199
一、地层及时代.....	199
二、孢粉分析和气候地层划分.....	200
第四节 宁波盆地和大碛盆地第四纪沉积环境与演化	204
第六章 宁波市断层活动性探测.....	207
第一节 主要断层概述	207
第二节 探测环境与方法选取和技术思路	208
一、探测环境与方法选取.....	208
二、断层活动性探测技术思路.....	211
第三节 断层活动性探测.....	215
一、宁波 - 邱隘断层 (F_5).....	215
二、慈城 - 宝幢断层 (F_6).....	220
三、北仑 - 奉化断层 (F_3).....	224
四、北仑 - 育王断层 (F_4).....	236
五、算山 - 曹隘断层 (F_2).....	242
六、宁波 - 小港断层 (F_1).....	257
七、保国寺断层 (F_{10}).....	266
八、育王山山前断层 (F_7)	274
九、招宝山断层 (F_9)	277
十、小港断层 (F_{15})	280
十一、其他断层.....	284

第四节 小 结	291
第七章 育王山山前断层详细探测和活动特征	293
第一节 概 述	293
第二节 西支断层定位与活动特征	294
一、断层沿线及两侧地貌特征	294
二、大比例尺地质地貌填图与槽探	300
三、西支断层空间展布与活动特征	318
第三节 东支断层定位与活动特征	320
一、断层沿线及两侧地貌特征	320
二、断层两侧地层	321
三、浅层地震勘探	321
四、钻孔联合地质剖面探测	329
五、东支断层空间展布与活动特征	335
第四节 育王山山前断层演化与大碇盆地形成机制	336
一、区域构造演化	336
二、育王山山前断层形成与发育	337
三、大碇盆地形成机制	338
主要参考文献	340
第三篇 宁波市主要断层地震危险性与危害性评价	343
第八章 宁波市主要断层地震危险性评价	344
第一节 宁波市及邻区地球动力学背景与地震环境	344
一、区域地球动力学背景	344
二、宁波市在区域地震环境中的位置	345
三、区域发震能力评价	345

第二节 断层最大潜在地震震级评估.....	347
一、育王山山前断层最大潜在震级评估.....	347
二、其他断层最大潜在震级评估.....	349
第三节 育王山山前断层破坏性地震发生概率.....	351
一、最大潜在地震复发间隔.....	351
二、最大潜在地震发生概率评估.....	352
第四节 宁波市断层地震危险性评价结果.....	353
第九章 育王山山前断层危害性评价.....	355
第一节 近断层强地震动评价.....	355
一、地脉动观测与第四系三维结构模型.....	355
二、设定地震的震源模型参数确定.....	366
三、强地震动的计算与合成.....	370
第二节 地震活动断层地表变形带预测.....	376
一、计算模型与参数.....	377
二、结果与分析.....	382
第三节 育王山山前断层震害防御分析.....	393
一、育王山山前断层的“避让”分析.....	395
二、近断层强地震动的影响分析.....	398
三、近断层强地震动引起的震陷评价结果分析.....	400
四、震害防御对策建议.....	402
主要参考文献.....	403
后记.....	406