

北京地区

主要活动断裂研究与地壳稳定性评价

谭成轩 丰成君 张 鹏 陈群策 安美建 等著

地质出版社

北京地区主要活动断裂研究与 地壳稳定性评价

谭成轩 丰成君 张 鹏 陈群策 安美建
秦向辉 孙炜锋 张春山 石菊松 张永双 著
吴树仁 吴满路 冯 梅 杨为民 戚帮申

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系国土资源大调查项目多年的研究成果。作者采用多种技术方法和手段,紧密围绕北京地区高度关注的主要活动断裂、现今地应力环境及地壳稳定性问题开展了系统的调查和分析研究。

本书可供从事工程地质、地震地质、活动构造等方面的科研和工程技术人员以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

北京地区主要活动断裂研究与地壳稳定性评价 / 谭成轩等著. —北京:地质出版社, 2014. 9

ISBN 978-7-116-08882-5

I. ①北… II. ①谭… III. ①活动断层-研究-北京
市②区域地壳稳定性-评价-北京市 IV. ①P548.21
②P313.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 152865 号

Beijing Diqu Zhuyao Huodong Duanlie Yanjiu yu Diqiao Wendingxing Pingjia

责任编辑:李凯明 田野

责任校对:王 瑛

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话:(010)82324508 (邮购部); (010)82324509 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)82324340

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:13.75

字 数:330 千字

版 次:2014 年 9 月北京第 1 版

印 次:2014 年 9 月北京第 1 次印刷

审图号:GS (2014) 1528 号

定 价:50.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-08882-5

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

本书系国土资源大调查项目的研究成果。作者采用多种技术方法和手段,紧密围绕北京地区高度关注的主要活动断裂、现今地应力环境及地壳稳定性问题开展了系统的调查和分析研究。

基于野外地质调查、探槽开挖和微地震监测,研究认为黄庄-高丽营断裂总体走向 NNE-NE,倾向 SE,倾角 $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$,具正断特征,并将其划分为 3 个基本段落:北段、中段和南段。北段近地表探槽揭露断层活动错动全新世地层,最大断距达 1.4m,微地震台网监测揭示黄庄-高丽营主断层面在深部表现为上陡下缓,倾向 SE,与近地表探槽开挖揭示断层产状一致;黄庄-高丽营断裂带和孙河南口断裂带深部微地震活动较弱,没有明显集中成带的现象;黄庄-高丽营断裂现今运动学特征总体表现为顺扭正断作用,以水平运动为主,现今活动速率为 $4.4 \sim 10\text{mm/a}$;北京地区主要活动断裂现今活动的动力学机制可能源于太平洋板块相对于欧亚板块的俯冲挤压作用,现今构造应力作用最大水平主应力方向为 NEE-SWW。

初步完成了首都圈地区深孔地应力测量与实时监测总体规划;通过首都圈地区 10 个关键构造部位深孔(500~1000m)地应力测量钻探工程,揭露了地壳浅表层岩体结构特征,随深度进行了系统的地应力测量,并开展了地应力实时监测,填补了首都圈地区深孔地应力测量与实时监测的空白,初步揭示了首都圈地区地壳浅表层现今地应力环境;平谷地应力实时综合监测台站全程记录了 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级大地震及其前后地应力大小和水位相对变化,尤其是大地震发生的前兆应力变化,为地震地质分析提供了重要依据;通过首都圈地区地应力实时监测台网各台站监测数据的对比分析,超前提出“唐山-滦县-昌黎一带现今构造活动异常,尤其是河北昌黎及其周围地区,需重点监测其未来发展趋势”的认识;十三陵地应力实时监测结果表明,该地区自 2013 年 4 月 1 日构造活动有所增强;河北昌黎和北京西峰寺地应力实时监测结果初步揭示了首都圈区域现今构造应力场演化过程和特点。

通过北京地区地壳稳定性综合研究和评价,确定北京平原区断裂带之间的地块为地壳次稳定级别,大部分断裂带为次不稳定级别,仅北西向南口-孙河断裂带两端即马池口-北七家和通州-朗府为地壳不稳定带,以及马坊和昌平西北南口山前断裂带附近区域为地壳不稳定区;运用深孔地应力测量与实时监测结果,对南口山前活动断

裂稳定性进行了分析,结果认为该断层活动的危险性有所增加,但在现今地应力条件下断层不存在滑动危险,目前断层仍处于稳定状态。

参加本项目野外调查、室内资料整理的主要人员有:谭成轩、陈群策、安美建、张春山、吴满路、张鹏、秦向辉、孙炜锋、丰成君、张永双、冯梅、吴树仁、石菊松、杨为民、戚帮申。

本书编写分工如下:第一章 绪论,由谭成轩编写;第二章 区域构造地质与新构造活动背景,由谭成轩、丰成君编写;第三章 北京地区主要活动断裂几何学特征研究,由谭成轩、安美建、冯梅编写;第四章 首都圈地区关键构造部位深孔地应力测量与实时监测,由谭成轩、张鹏、秦向辉、丰成君编写;第五章 北京地区现今构造应力场综合研究,由丰成君、谭成轩编写;第六章 北京地区主要活动断裂运动学和动力学特征研究,由谭成轩、丰成君编写;第七章 北京地区地壳稳定性评价,由谭成轩编写;第八章 结论与建议,由谭成轩编写。

在项目的执行过程中,得到了中国地质调查局水环部、中国地质科学院项目办、中国地质科学院地质力学研究所等相关部门的大力支持;在项目的开展过程中,得到了中国地质调查局水环部文东光主任、郝爱兵副主任和李铁锋处长、原水环部殷跃平主任、张作辰处长、张开军博士和李晓春博士,中国地质科学院王小烈书记、董树文副院长、朱立新副院长、王瑞江副院长和吴珍汉副院长,中国地质科学院地质力学研究所龙长兴所长、徐龙强书记、侯春堂副所长、何长虹书记、赵越副所长、李贵书副所长、马寅生副所长、孟宪刚处长和张永双处长等相关领导的关心、指导和帮助;在项目的研究过程中,得到了项目组研究人员的精诚协作及北京市地质工程设计研究院钻探施工的积极配合。对于以上支持、关心、指导、帮助、协作和配合的相关单位及人员,表示衷心的感谢!

编 者

2014年3月

目 录

前言

第一章 绪 论	(1)
一、研究区以往工作程度及存在的主要问题	(2)
二、主要研究内容	(3)
三、总体思路、技术路线和技术方法	(4)
四、主要成果和认识	(6)
第二章 区域构造地质与新构造活动背景	(11)
第一节 区域构造地质背景	(11)
一、区域地质概述	(11)
二、区域主要构造体系概述	(11)
第二节 区域地球物理场和深部构造背景	(13)
一、区域地球物理场的基本特征	(13)
二、地壳和上地幔结构特征	(15)
第三节 新构造活动基本特征	(16)
一、北京地区新构造活动基本特征	(19)
二、北京平原区主要断裂活动性分析	(31)
第四节 小 结	(34)
第三章 北京地区主要活动断裂几何学特征研究	(35)
一、主要研究历史	(35)
二、研究现状	(35)
第一节 主要活动断裂地面变形特征及其灾害效应调查	(37)
一、典型地表变形破坏调查	(38)
二、典型探槽工程地质研究	(44)
第二节 主要活动断裂近地表几何学特征分析	(45)
一、地面调查	(45)
二、探槽开挖	(47)
三、钻探工程	(48)
第三节 主要活动断裂微地震台网监测	(48)
一、微地震台网监测部署	(49)
二、微地震监测数据	(50)
第四节 主要活动断裂深部结构分析	(57)

一、微地震层析成像和三维波速结构分析	(57)
二、主要活动断裂深部结构分析	(59)
第五节 震源机制解在断裂深部结构和区域构造应力场分析中的应用	(59)
一、震源机制解分析	(59)
二、断裂深部结构分析	(61)
三、区域构造应力场分析	(61)
第六节 小 结	(62)
第四章 首都圈地区关键构造部位深孔地应力测量与实时监测	(64)
第一节 首都圈地区深孔地应力测量与实时监测总体规划	(64)
一、首都圈地区地应力测量与实时监测研究现状	(64)
二、首都圈地区地应力测量与实时监测存在的问题	(68)
三、首都圈地区深孔地应力测量与实时监测总体规划	(68)
第二节 首都圈地区深孔地应力测量	(72)
一、深孔地应力测量及综合分析	(72)
二、岩性和岩体结构对地应力测量结果的影响研究	(80)
三、地应力测量结果在活动断裂研究中的应用	(87)
第三节 首都圈地区地应力实时监测	(91)
一、北京平谷地应力实时监测综合台站对 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级大地震的 响应	(92)
二、唐山 - 滦县 - 昌黎一带现今构造活动异常	(93)
第四节 首都圈地区构造应力场基本特征分析	(102)
一、区域新构造活动分析	(102)
二、首都圈地区深孔地应力测量结果分析	(103)
第五节 小 结	(104)
第五章 北京地区现今构造应力场综合研究	(105)
第一节 地壳形变场分析	(105)
第二节 震源机制分析	(105)
第三节 首都圈地区关键构造部位深孔地应力测量与实时监测分析	(108)
第四节 北京地区现今构造应力场有限元数值模拟分析	(110)
一、地质模型建立	(111)
二、位移和应力边界条件分析	(111)
三、岩石物理力学参数确定	(113)
四、数学计算模型建立	(113)
五、数值模拟与结果分析	(113)
第五节 小 结	(134)
第六章 北京地区主要活动断裂运动学和动力学研究	(141)
第一节 主要活动断裂运动学特征研究	(141)
一、地面调查	(141)

二、探槽开挖·····	(141)
三、断层泥石英形貌研究·····	(142)
四、断层(地裂缝)位移监测、水准测量和GPS测量·····	(142)
五、现今地应力测量与构造应力场有限元数值模拟分析·····	(142)
第二节 北京地区主要活动断裂动力学机制研究·····	(147)
一、大地构造背景与区域新构造活动分析·····	(147)
二、震源机制解分析·····	(148)
三、现今地应力测量监测与构造应力场分析·····	(148)
第三节 小 结·····	(148)
第七章 北京地区地壳稳定性评价·····	(149)
第一节 北京地区工程地质特征研究·····	(149)
一、北京地区工程地质分布特征·····	(149)
二、岩土工程地质力学特性分析·····	(151)
三、岩土工程地质特征对岩土体稳定性的影响分析·····	(152)
第二节 北京地区地壳稳定性分析·····	(154)
一、北京地区构造稳定性分析·····	(154)
二、北京地区岩土体稳定性分析·····	(157)
三、北京地区地面稳定性分析·····	(158)
四、北京地区断裂活动影响分区·····	(160)
第三节 北京地区地壳稳定性评价分区·····	(160)
一、北京地区地壳稳定性评价内容的确定·····	(160)
二、北京地区地壳稳定性综合评价分区·····	(160)
第四节 南口山前活动断裂稳定性分析·····	(187)
一、钻孔附近主要活动断裂及特征概述·····	(188)
二、北京十三陵钻孔水压致裂地应力测量与断层滑动危险性分析 (2010年1月之前)·····	(188)
三、北京十三陵钻孔地应力监测与断层滑动危险性分析(2011年8月4日~ 2013年5月3日)·····	(192)
四、结论与认识·····	(200)
第五节 小 结·····	(201)
第八章 结论与建议·····	(202)
一、结论·····	(202)
二、建议·····	(205)
参考文献及资料·····	(207)

第一章 绪 论

北京作为中国的首都,是我国政治、经济和文化中心。大地构造上,北京地区处于阴山纬向构造体系、祁吕-贺兰山字型构造体系东翼与新华夏构造体系的交接部位,北部为燕山构造带,西部为太行山构造带,东南部主要为郯庐断裂构造带,中心为华北平原北部。北京地区新构造活动强烈、地震多发。

继 20 世纪我国东部邢台 (1966 年, $M_s = 7.2$)、河间 (1967 年, $M_s = 6.3$)、渤海 (1969 年, $M_s = 7.4$)、海城 (1975 年, $M_s = 7.3$)、唐山和滦县 (1976 年, $M_s = 7.8$ 和 $M_s = 7.1$) 一系列大地震之后,“5·12”汶川大地震 (2008 年, $M_s = 8.0$) 等,再次激发中国地质工作者对地震地质问题的思考。

李四光教授把地震地质研究的目标概括为两个方面:一是确定中长期地震危险性预测区带,为短期或临震预报指明方向和工作重点,为防灾减灾服务;二是在确定的地震危险性区带开展活动断裂研究和区域地壳稳定性评价,寻找“安全岛”或“安全带”,为国家重大工程规划、建设和安全服务。基于我国目前管理体制,前者属于中国地震局研究范围,而后者属于国土资源部的研究领域。

为此,自 2000 年以来,中国地质调查局部署开展了“国家重大工程区域地壳稳定性调查与评价”(2000~2010 年)和“重大工程区主要活动断裂调查与区域地壳稳定性评价”(2011~2015 年)计划项目,先后完成了西气东输、青藏铁路、滇藏铁路、南水北调西线、三峡水库引水等一系列国家级重大工程的调查评价工作,为重大工程规划和安全建设提供了重要的地质科技支撑。“北京地区主要活动断裂研究与地壳稳定性评价”(编号:1212010814052 (2008~2010 年)和 1212011120070 (2011~2012 年))是上述计划项目的工作项目之一,其研究目标如下:

(1) 重点对黄庄-高丽营活动断裂带进行野外路线地质调查和勘探,配合微地震台网监测方法,通过微地震震源定位和地震层析成像技术,揭示北京地区隐伏的黄庄-高丽营活动断裂带的存在及其三维空间产状展布,查明其三维结构、分段性及其活动性等几何学特征;

(2) 通过野外路线地质调查,在北京平谷、北京十三陵、北京西峰寺、北京东南、北京西南等地附近选择孔位进行深孔 (600~800m) 地应力测量与监测,建立北京地区地应力实时监测网,填补北京地区没有深孔地应力测量与实时监测的空白,揭示北京地区现今地应力环境;

(3) 通过北京地区现今构造应力场综合分析,结合已有断层位移监测数据,开展北京地区主要活动断裂运动学和动力学研究,揭示主要活动断裂的活动方式和定量活动速率;

(4) 通过构造稳定性、岩土体稳定性和地面稳定性分析,运用数学地质方法,完成

北京地区地壳稳定性评价分区和主要活动断裂稳定性分析,为首都重大工程规划、城市安全建设等提供地质依据,为首都安全增加一份保障。

一、研究区以往工作程度及存在的主要问题

北京地区是我国地质学的摇篮,我国最初的区域地质调查从这里起步,在此诞生了我国第一幅地质区测图,培育了我国第一代地质学家和以后几代地质学家。北京地区是我国开展地质调查(基础地质、矿产地质、水文地质、工程地质、地震地质和区域地壳稳定性评价、地热地质、环境地质、遥感地质等)最详细地区之一。各项调查和研究应用了先进的技术和手段,积累了丰富的资料。因此,下面主要介绍与该专著有关的以往工作程度及存在的主要问题。

1. 研究区以往工作程度概述

(1) 1976年7月28日7.8级唐山地震发生后,由北京市政府组织在京的中央和地方科研、教学单位实施了“北京市地震地质会战”,共分北京及邻区遥感和航空解译、北京地区构造体系和活动构造体系调查研究、北京地区深部地质构造调查研究、北京平原区全新世构造活动调查研究、北京地区地壳形变与地质构造和地震活动的关系研究、北京地区地震活动特征研究、北京地区地质构造与地震活动的数学-物理模拟模型试验、北京平原区地震影响小区划研究等八个专题,获得了丰富的成果,最后由于种种原因,没有进行综合集成研究。但仍是迄今为止北京地区开展的最系统、最全面的一项研究工作,这些成果不仅为北京地区地震预报、防震减灾,也为首都城市建设布局提供了基础资料。

(2) 1980~1985年,原地矿部五六二综合大队开展了“京津地区地震地质研究”。

(3) 1983年1月,北京市人民政府、地矿部、城乡建设环境保护部进行“北京航空遥感综合调查”(8301工程)。

(4) 1983~1990年,北京市地质矿产局物化探队利用磁法、电法和重力等物探手段对北京平原区进行编图。

(5) 1986~1990年,由陈庆宣院士负责国际地质对比计划IGCP-250项目“区域地壳稳定性与地质灾害”对北京地区地壳稳定性进行了研究和初步评价。出版《区域地壳稳定性和地质灾害研究》专刊三期(英文)。

(6) 2004~2007年,北京市地质勘查局负责完成中国地质调查局项目“北京市多参数立体地质调查”,其中开展了“北京平原区主要活动断裂与地壳稳定性调查评价”专题研究。

(7) “十五”期间中国地震局实施了“大城市活动断层探测”项目,北京、天津、石家庄等首都圈地区的重要城市均开展了活动断层探测工作,出版了专著《首都圈地区地壳最新构造变动与地震》。

(8) 2008~2010年,天津地质调查中心组织开展中国地质调查局项目“环渤海活动断裂调查与区域地壳稳定性评价”。

(9) 相关学者(见参考文献)以论文、专著、编图等形式对北京地区新构造、活动断裂、地应力、构造应力场、地壳稳定性等进行研究与探索。

2. 存在的主要问题及需深入研究的方面

(1) 主要隐伏活动断裂空间展布。中国地震局在北京及其周边地区建立了固定地震监测台网,但其台网间距较大,需要在主要隐伏活动断裂局部重点地段建立天然微地震观测移动台网进行精细监测,通过地震震源定位和地震层析成像技术,对该断裂带空间展布(重点是隐伏地段)进行定位,进而进行断裂活动性研究。

(2) 深部现今地应力环境。北京地区已有地应力测量结果往往仅代表局部应力场特征,且深度较浅,需开展能够代表区域构造应力场的深孔地应力测量、地应力随深度变化规律分析以及构造应力应变场研究,为断裂空间活动差异性分析、地壳稳定性评价等提供依据。同时建立北京地区深孔地应力实时监测网,为区域新构造活动分析、重大工程规划、城市安全建设、矿山安全开采、国防建设等提供现今地应力数据。

(3) 地壳稳定性评价及主要活动断裂稳定性分析。基于上述两方面的关键问题制约,北京地区地壳稳定性评价及主要活动断裂稳定性分析有待完善和深入。

二、主要研究内容

1. 资料收集整理分析

对北京地区已有新构造活动、活动断裂调查及监测、地应力测量、构造应力场、构造变形场、工程地质、水文地质、地震地质、地球物理探测等研究成果收集整理分析。

2. 主要活动断裂野外地质调查

在已有研究成果的基础上,重点对黄庄-高丽营活动断裂带进行路线地质详细调查,对其可能穿越的工程(如地铁、引水渠等)、地表和地上建筑附近开展现今活动变形迹象调查,并配合必要的手段(如槽探等)进行勘探验证。

3. 主要活动断裂微震台网监测

在黄庄-高丽营活动断裂带路线地质详细调查的基础上,重点对隐伏地段进行微震台网监测,揭示黄庄-高丽营断裂带微地震活动特征;根据微地震震源定位和地震到时进行层析成像反演,获得研究区三维地震波速结构,揭示断裂的存在及其三维空间产状展布。

4. 关键构造部位地应力测量与实时监测钻探工程孔位确定

在北京地区现今构造应力场初步分析和区域新构造活动、活动断裂、工程地质调查的基础上,分别在北京平谷、北京十三陵、北京西峰寺、北京东南、北京西南等关键构造部位进行路线构造地质和工程地质调查,确定地应力测量与实时监测孔位。并对孔位附近的断裂、构造、地层、工程地质特性、地形地貌等进行详细调查,初步分析测孔地应力状态主要影响因素,结合孔位的实际地形、岩体不均质性等特点,进行地应力测量前各种影响因素超前预测分析,确定钻探深度和测量深度。

5. 钻探工程及地应力测量与实时监测

在北京平谷、北京十三陵、北京西峰寺、北京东南、北京西南等关键构造部位所确定孔位进行钻探工程和岩心系统编录,并对代表性地层层位进行取样;在钻探的基础上,开展系统的水压致裂地应力测量,分析地应力状态随深度变化规律,揭示测点应力卸荷区、应力增高区和原始应力区(即构造应力面以下),确定最大主应力方向,并与地震震源机

制确定的最大主应力方向进行对比分析；然后选择适宜深度，采用压磁应力仪进行地应力实时监测，建立北京地区地应力实时监测网。

6. 室内岩石力学试验研究

对钻孔岩心和附近不同岩体进行同等围压条件下岩石抗压强度、抗张强度、抗剪强度、弹性模量、泊松比、密度等参数测定，用于地应力测量与实时监测结果影响因素分析、不同孔位地应力测量结果的校正和对比分析、三维构造应力场研究等。

7. 主要活动断裂活动性研究

依据野外详细调查、微地震活动频度和强度、震源空间分布、微震层析成像所揭示的三维波速结构、断层位移监测、现今地应力环境、深部地应力状态、现今构造应力场等研究成果，进行主要活动断裂几何学、运动学和动力学研究。

8. 北京地区地壳稳定性评价和主要活动断裂稳定性分析

在北京地区主要断裂空间展布精确定位、现今地应力测量与实时监测、地形变场、断裂活动性、地震活动性等研究的基础上，配合现今三维构造应力场数值模拟分析，开展北京地区地壳稳定性评价和主要活动断裂稳定性分析，揭示其对首都安全的影响，为首都规划和安全建设、国防建设、深部矿山安全开采等提供地质依据。

三、总体思路、技术路线和技术方法

1. 总体思路

以天然微地震层析成像技术与地应力测量和实时监测原理为指导，以北京及其外围地区新构造活动调查、地应力测量、地应力场研究等成果为基础，以黄庄—高丽营断裂带调查研究和北京平谷、北京十三陵、北京西峰寺、北京东南、北京西南等关键构造部位地应力测量与实时监测为主线。通过地面路线地质详细调查、微地震台网监测以及必要的勘探等手段，基本查明黄庄—高丽营断裂带的存在及其三维空间产状展布（尤其是平原覆盖区），并结合断层位移监测、现今地应力环境、深部地应力状态、地震活动分析等成果，进行断层活动的运动学和动力学分析；利用3S技术，分别在北京平谷、北京十三陵、北京西峰寺、北京东南、北京西南等关键构造部位开展地应力测量孔位路线构造地质和工程地质调查，确定地应力测量孔位，开展钻探工程，进行5个深孔（600~800m）水压致裂地应力测量，分析地应力随深度变化规律，揭示测点应力卸荷区、应力增高区和原始应力区（即构造应力面以下），然后选择适宜深度分别进行地应力实时监测，建立北京平谷、北京十三陵、北京西峰寺、北京东南、北京西南5个地应力实时监测台站，构建北京地区地应力实时监测网，填补北京地区深孔地应力测量与实时监测的空白，揭示北京地区现今地应力环境；在北京地区主要断裂空间展布精确定位、断裂活动性、深部现今地应力测量、构造应力场、地形变场、地震活动性等研究的基础上，配合现今构造应力场数值模拟，开展北京地区地壳稳定性评价和主要活动断裂稳定性分析，揭示其对首都安全的影响，为首都规划和安全建设、国防建设、深部矿山安全开采等提供地质依据。

2. 技术路线

（1）充分搜集整理已有新构造活动、活动断裂的调查与监测、地球物理探测、地应

力测量、构造应力场、构造形变场、工程地质、水文地质、地震地质等相关研究资料。

(2) 在已有研究成果的基础上,重点对黄庄-高丽营活动断裂带进行路线地质详细调查,对其可能穿越的地下工程(如地铁、引水渠等)、地表和地上建筑附近开展现今活动变形迹象调查,并配合必要的手段(如槽探)进行勘探验证。

(3) 在黄庄-高丽营活动断裂带路线地质详细调查的基础上,重点对隐伏地段按照微地震台网监测的要求部署微震台站进行监测。

(4) 利用已有研究成果初步确定北京平谷、北京十三陵、北京西峰寺、北京东南、北京西南等关键构造部位地应力测量和监测区域,进行路线地质调查,确定地应力测量与监测孔位,并尽量选择燕山期花岗岩体。一是花岗岩体相对较完整、裂隙不发育,可保证测量和监测精度;二是岩体相对稳定;三是便于不同孔位的对比分析。对测量孔位附近的断裂、构造、地层、工程地质特性、地形地貌等进行详细调查,初步分析测孔地应力状态主要影响因素。结合测量孔位的实际地形、岩体不均质性等特点,进行地应力测量前各种影响因素超前预测分析,确定钻孔深度和测量深度。

(5) 按水压致裂地应力测量和实时监测的要求进行钻探工程,全程取心;依据岩心的完整性随深度进行系统的水压致裂地应力测量,达到分析地应力随深度变化规律的目的;采集岩心样品进行室内同等围压条件下的岩石抗压强度、抗张强度、抗剪强度、弹性模量、泊松比等物理力学参数测试,用于不同孔位地应力测量结果的校正对比分析和三维构造应力场数值模拟研究;选择适宜深度进行地应力实时监测,建立北京地区地应力实时监测网。

(6) 在北京地区主要断裂空间展布精确定位、断裂活动性、深部现今地应力测量、构造应力场、地形变场、地震活动性等研究的基础上,配合现今构造应力场数值模拟,进行北京地区地壳稳定性评价和主要活动断裂稳定性分析,揭示其对首都安全的影响,为首都规划和安全建设、国防建设、深部矿山安全开采等提供地质依据。

技术路线如图1-1所示:

3. 技术方法

(1) 地面调查:对主要活动断裂开展路线地质详细调查;运用3S技术对地应力测量与监测区域进行野外路线地质调查,确定地应力测量与监测孔位。

(2) 微地震监测与地震层析成像技术:通过微地震台网监测,根据微地震震源定位和地震到时进行层析成像反演,获得研究区三维地震波速结构,揭示断裂的存在及其三维空间产状展布。

(3) 钻探技术:按水压致裂地应力测量和实时监测的要求进行钻探工程。

(4) 地应力测量与监测技术:按水压致裂地应力测量的要求随深度进行系统的地应力测量,分析地应力随深度变化规律;按地应力实时监测的要求,依据钻孔实际情况,在适宜深度运用压磁应力仪进行地应力监测,并依据地应力监测变化趋势,适时调整监测数据采集频率,以满足分析研究需要。

(5) 室内测试:对地应力测试对应深度的岩心进行同等围压条件下的岩石物理力学参数测试。

(6) 综合分析:在北京地区主要断裂空间展布精确定位、断裂活动性、深部现今地应力测量、构造应力场、地形变场、地震活动性等研究的基础上,配合现今构造应力场数

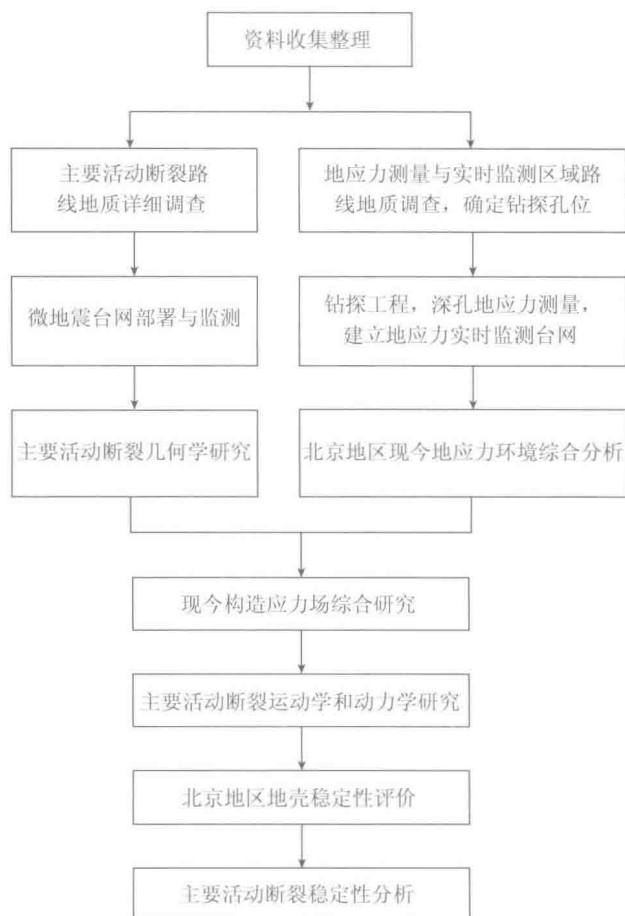


图 1-1 技术路线框图

值模拟，运用数学地质方法，开展北京地区地壳稳定性评价和主要活动断裂稳定性分析。

四、主要成果和认识

1. 初步揭示了北京地区主要隐伏活动断裂的几何学特征

通过地面调查、探槽开挖等研究，揭示了黄庄—高丽营活动断裂北段近地表的几何学特征。①地面调查表明，黄庄—高丽营断裂近地表总体走向 NNE—NE，北西侧上升、南东侧下降，并将其划分为 3 个基本段落：北段（即南口—孙河断裂之北东段落）、中段（南口—孙河断裂和永定河断裂之间段落）和南段（永定河断裂之西南段落）；②探槽揭示黄庄—高丽营断裂北段近地表存在明显断层错动，主断层产状为 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}/SE \angle 40^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，上盘下降、下盘上升，断层活动错动全新世地层，最大断距 1.4m，近断层面可见上盘地层具微牵引现象，且上、下盘同一土层厚度有差异，上盘厚度略大于下盘厚度，具同沉积现象，反映全新世以来，地层沉积时黄庄—高丽营断裂可能一直在活动，具有明显的正断特征。

在地面调查、探槽开挖等研究的基础上，首次在北京城区隐伏的黄庄—高丽营断裂带和孙河—南口断裂带部署微地震监测台网，通过地震震源定位和地震层析成像技术，对主

要隐伏活动断裂带空间展布进行精确定位,揭示了主要隐伏黄庄-高丽营活动断裂的深部几何学特征和地震活动特点。①黄庄-高丽营主断层面在深部表现为上陡下缓,倾向SE,与近地表探槽开挖揭示断层产状一致;②黄庄-高丽营断裂带和孙河-南口断裂带深部微地震活动较弱,没有明显集中成带的现象。

2. 初步探讨了北京地区主要活动断裂的运动学和动力学特征

通过地面调查、探槽开挖、断层泥石英形貌、断层位移监测、水准测量、GPS 测量、现今地应力测量与构造应力场等方面研究,揭示黄庄-高丽营断裂现今运动学特征总体表现为顺扭正断作用,以水平运动为主,现今活动速率为 $4.4 \sim 10\text{mm/a}$ 。通过大地构造背景与区域新构造活动、震源机制解、现今地应力测量监测与构造应力场等方面分析,认为北京地区主要活动断裂现今活动的动力学机制(即主动力量)可能源于太平洋板块相对于欧亚板块的俯冲挤压作用,现今构造应力作用最大水平主应力方向为北东东-南西西。

3. 初步厘定了首都圈地区深孔地应力测量与实时监测在地震地质研究方面的思路方法

在认真学习李四光教授关于地震地质研究理论方法的基础上,已初步厘定了深孔地应力测量与实时监测在地震地质研究方面的思路方法:①按照构造应力场和活动断裂带的研究思路选择关键构造部位进行深孔地应力测量与实时监测台站建设;②考虑区域水平最大主应力方向、监测钻孔周围历史强震及其发震断裂展布、钻孔随深度地应力状态变化规律等因素安装地应力实时监测仪器;③保持监测仪器长期连续观测,通过不同关键构造部位构造地质环境和岩体结构、岩石物理力学性质、地应力大小绝对测量结果、实时监测地应力大小相对变化等方面的对比分析,捕捉和分析大地震发生的地应力前兆异常;④通过构造应力场综合分析、三维数值模拟等方法手段,研究地壳浅表层地应力绝对测量结果和相对监测结果与深部震源地应力状态之间的关系,为区域地壳稳定性和地质安全评价提供现今构造应力场背景,同时为地震监测预报提供地质依据。

4. 初步完成了首都圈地区深孔地应力测量与实时监测总体规划

按照上述思路方法,初步完成了首都圈地区深孔地应力测量与实时监测总体规划。已在首都圈地区北京平谷、北京十三陵、北京西峰寺、北京密云、河北省昌黎、河北省紫荆关、山东省平度、山东省苍山、北京李四光纪念馆和河北省唐山 10 个关键构造部位开展了深孔(500~1000m)地应力测量,并已建成 9 个地应力实时监测台站(北京李四光纪念馆正在建设中);2013~2020 年将分别在河北省迁安、辽宁省海城、河北省秦皇岛、河北省张家口、河北省石家庄西侧、河北省邢台、河北省磁县、山东省济南西南、河南省郑州西南、河南省洛阳西南等 10 个关键构造部位开展深孔(600~1000m)地应力测量与实时监测台站建设。通过该规划的实施,将构建首都圈地区深孔地应力测量与实时监测台网,填补首都圈地区深孔地应力测量与实时监测台网的空白,揭示首都圈地区现今地应力环境,为区域新构造活动分析、地壳稳定性评价、重大工程规划、城市安全建设、矿山安全开采、国防建设等提供现今地应力数据,同时,为首都安全增加一份保障。

5. 初步揭示了首都圈地区地壳浅表层现今地应力环境

通过首都圈地区 10 个关键构造部位深孔(500~1000m)地应力测量钻探工程,揭露了地壳浅表层岩体结构特征,随深度进行了系统的地应力测量,并进行地应力实时监测,

初步揭示了首都圈地区地壳浅表层现今地应力环境,填补了首都圈地区无深孔地应力测量和实时监测的空白。

6. 地应力实时监测取得重要成果和认识

首都圈地区9个关键构造部位已建成的地应力实时监测台站运行正常,能够实时获取地应力相对变化连续监测数据,并取得重要成果和认识。

(1) 北京平谷地应力实时监测综合台站对2011年3月11日日本9.0级大地震的响应。日本9.0级大地震对中国大陆的影响,是国内外专家与社会各界普遍关注的热点问题。平谷地应力实时综合监测台站全程记录了2011年3月11日日本9.0级大地震及其前后地应力大小和水位相对变化,尤其是大地震发生的前兆应力变化,客观记录了日本9.0级大地震对中国大陆东部现今地应力场的重要影响。地应力监测数据表明太平洋板块向西俯冲导致的日本9.0级强烈地震对中国大陆的应力状态产生了显著影响,在该站周围地壳浅表层沿东西方向的挤压应力大幅增加,增幅达22kPa,这样大的增幅对应力集中达到临界状态的活动断层具有重要影响。同时该综合监测站地下水位在大地震后4小时左右上升约50cm,日本9.0级大地震发生之后,沿中国东部重要活动断裂——郯庐走滑断裂地下水位普遍升高约10cm,与该监测站水位显示类似的异常变化规律。国家地震局GPS监测数据也表明日本9.0级大地震发生后,中国大陆东部地壳形变显著,并表现出郯庐走滑断裂东、西两侧位移的差异性。平谷地应力实时监测综合台站对2011年3月11日日本9.0级大地震的响应及其结果分析,为地震地质研究提供了重要依据。

(2) 唐山-滦县-昌黎一带现今构造活动异常。通过已有首都圈地区地应力实时监测台站监测数据的对比分析,发现自2011年12月25日以来,河北昌黎地应力实时监测综合台站NE21°方向探头,即1976年唐山大地震发震断裂方向,地应力大小异常快速变化,与首都圈地区其他关键构造部位地应力实时监测台站同一时间范围内地应力监测结果相比较,属于较大异常情况,在提出唐山-滦县-昌黎一带现今构造活动异常超前认知之后,于2012年5月28日和29日、6月18日、8月26日及2013年1月11日在唐山及其周围地区分别发生了4.8级、3.2级、4.0级、3.3级和3.0级地震,检验了地应力监测方法的可行性和地应力监测结果的有效性。

通过对首都圈地区地应力大小监测结果对比分析和唐山及其周围地震发震背景的综合研究认为:2012年和2013年唐山及其周围地震与1976年7月28日唐山7.8级和滦县7.1级地震发震断裂活动有关;河北昌黎地应力大小实时监测结果及其异常可能反映另一构造应力环境;中国地震局地壳应力研究所对昌黎附近的地下流体(水氡)监测自2011年12月以来表现一定程度的异常;2012年滦县周围的铁矿勘察钻孔在地下800m左右的太古宙混合花岗岩中出现较高的承压水(自喷出地表高度约6.3m)现象;同时,河北昌黎地应力测量与实时监测钻探过程中,在钻孔430~450m深度出现由于高水平应力作用导致的饼状岩心,其在华北地区属于首次发现。

综上所述,唐山-滦县-昌黎一带,尤其是河北昌黎及其周围地区,现今构造活动异常,需重点监测其未来发展趋势。

(3) 十三陵地应力实时监测异常。十三陵地应力实时监测结果表明,自2011年8月4日~2013年5月3日,该地应力监测仪器已连续、稳定地获得了地应力实时监测数据。根据地应力大小相对变化的幅度,可将其分为缓慢变化和快速变化两个阶段:①缓慢变化

阶段(2011年8月4日~2013年3月31日),最大水平主应力平均值由5.30MPa增加到7.56MPa;②快速变化阶段(2013年4月1日~5月3日),最大水平主应力平均值由7.56MPa增加到16.86MPa。同时,在地应力大小相对变化过程中,最大水平主应力方向由局部北北西方向逐渐过渡到区域北东东方向。上述结果表明该地区现今构造活动有所增强。

(4)地应力实时监测揭示首都圈区域现今构造应力场演化过程和特点。河北昌黎地应力实时监测台站地应力监测结果表明,2011年12月25日(该台站地应力监测起始日期)~2012年6月5日期间地应力监测结果反映2011年3月11日日本9.0级大地震发生后华北地区表现为近东西向拉张作用,最大水平主压应力为近南北方向,这与日本9.0级大地震所诱发的华北地区同震位移所反映的区域构造作用效应相吻合。而2012年6月6日以来,昌黎台站地应力监测结果反映华北地区表现为近东西向主要为构造挤压作用,最大水平主压应力为近东西方向,说明区域构造应力作用恢复到日本9.0级大地震之前华北地区最大水平主应力方向,并且在区域构造应力作用方向转换的过程中会导致地震的发生(如2012年5月28日和29日及6月18日在唐山及其周围地区还分别发生了4.8级、3.2级和4.0级地震)。这一认识的获得对于地震地质研究和地震预测预报具有重要意义。

北京西峰寺地应力实时监测结果表明,NE88°监测探头发生不同程度的突变(50~1000kPa),但总体趋势变化不大,反映了该监测台站对远场近东西向区域现今构造作用的响应。

7. 初步揭示了北京地区现今构造应力场基本特征

首都圈地区现今地壳形变场分析揭示北京地区现代地壳运动主要受太平洋板块向欧亚板块俯冲造成的近东西向构造作用控制,最大水平主压应力方向为近东西向,现代地壳形变明显受北北东向和北西向两组断裂活动影响。震源机制解分析反映北京地区现今最大主压应力为北东东-南西西向,倾角不大,以水平构造应力作用为主。首都圈地区关键构造部位深孔地应力测量与实时监测揭示北京地区现今构造应力作用最大水平主应力方向为北东东-南西西。通过北京地区现今构造应力场有限元数值模拟,全面定量分析了北京地区现今构造应力场的总体分布特征,基本实现了由有限的地应力测点推广到区域空间应力场的目的;初步揭示了北京地区地壳浅表层最大水平剪应力大小的分布特征,通过剪应力相对大小参数(μ_m)分析,认为北京地区地壳浅表层 μ_m 值均没有达到临界值,基本没有发生断层活动的危险性,然而,主要活动断裂带内局部的 μ_m 值所反映出较高的剪应力积累水平值得关注;北京地区地壳浅表层在100~600m深度范围内,昌平西南南口山前断裂带北端附近区域岩体破裂危险度值较高,为0.70~1.20,局部出现岩体不稳定地区,除此以外,北京其他地区岩体破裂危险度值多位于0~0.70之间,均属于岩体稳定地区。

8. 完成了北京地区地壳稳定性评价分区

通过北京地区地壳稳定性综合研究和评价,确定北京平原区断裂带之间的地块为地壳次稳定级别,大部分断裂带为次不稳定级别,仅北西向南口-孙河断裂带两端即马池口-北七家和通州-郎府为地壳不稳定带,以及马坊和昌平西南南口山前断裂带附近区域为地壳不稳定区。

9. 初步探索了深孔地应力测量与实时监测结果在活动断裂稳定性分析中的应用

运用十三陵深孔原地应力测量与实时监测结果对该钻孔附近南口山前活动断裂稳定性