

车用太 王吉易 李一兵 鱼金子 等 编著

首都圈

# 地下流体监测 与地震预测

气象出版社

5.75

5

首 都 圈

# 地下流体监测与地震预测

车用太 王吉易 李一兵 鱼金子等编著

气象出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

首都圈地下流体监测与地震预测/车用太等编著.北京:气象出版社,2004.5

ISBN 7-5029-3757-9

I.首… II.①车… III.①地下-流体流动-监测-北京市②地震观测-北京市③地震预报-北京市 IV.P315.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 036672 号

出 版 者:气象出版社

地 址:北京中关村南大街 46 号

邮 编:100081

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail: [qxcbs@263.net](mailto:qxcbs@263.net)

责任编辑:郭彩丽

终 审:袁信轩

封面设计:王 伟

责任技编:都 平

责任校对:王瑞民

印 刷:北京京科印刷有限公司

发 行:气象出版社

开 本:787×1092 1/16

印 张:13

字 数:312 千字

版 次:2004 年 5 月第一版

印 次:2004 年 5 月第一次印刷

定 价:36.00 元

## 序

地震是可以预测的,然而预测成功是十分艰难的。中国的地震学家们,为地震预测奋斗了将近半个世纪,曾成功预测 1973 年 2 月海城地震,也曾对 1976 年 7 月唐山地震预测失败,在成功与失败的交替中前进着。尽管地震预测的科学征途是艰难曲折的,但他们却一如既往地努力着,从来也没有动摇过,更没有退却,还将继续奋斗,直到把地震预测的科学堡垒攻下来,为人类的防震减灾事业做出较大的贡献为止。

地震预测的科学探索,无疑将是长期的,需要一代一代的地震学家们去不断努力。随着 21 世纪的到来,开拓我国地震监测与预测事业的老一代地震学家们将逐步退出他们所热爱的事业,新一代年轻的地震学家们开始逐渐接替这一艰苦的事业。老一代地震学家们,在即将退出“战场”之际,把自己几十年的成败实践与科学认识以专著的形式留给新一代,也许是新老交接的最好的方式之一。《首都圈地下流体监测与地震预测》一书,正是在这样的历史背景下编写的。

首都圈地区是我国政治、经济与文化的中心,这个地区的防震减灾事业具有特殊的意义。国家一直对这个地区的地震监测与预测给予高度的关注。在地下流体学科方面,创建了我国第一个地下水动态观测网,第一个水文地球化学观测台站,发展出水温(地热)观测、汞观测、断层气观测等新技术,培养出一批又一批专家,不仅促进了这个地区而且带动了全国的地震地下流体前兆的监测、研究与地震预测科技的发展,在国际上也产生了积极的影响。

《首都圈地下流体监测与地震预测》一书,系统总结了这个地区地震地下流体前兆监测的历史与现状,各类测项的正常动态类型与特征,震例与地震预测技术,并展望了美好的未来。该书具有系统性,从观测到分析,从科学思路到方法探索等作了系统介绍;该书具有资料性,从台网的基础资料与各类震例,实实在在地作了论述,可作为今后监测与预测工作中的工作手册;该书具有实用性,从布网到观测,从观测到数据产出,从正常动态的认识到的异常识别,从异常识别到地震预测,对地震监测与预测的各个环节总结出实用性的步骤与方法;该书具有创新性,对预测的科学思路,对地震分析预报方法,在地下流体学科发展等方面提出了新的见解与新的方法。因此,该书是值得一读的科学专著。

我祝贺《首都圈地下流体监测与地震预测》一书的出版,我希望该专著在推进我国地震地下流体学科发展、增强我国地震地下流体学科在地震监测与预测中的作用,提高我国防震减灾的能力等方面产生积极的影响。

中国地震局副局长

陈建民

2002 年 8 月·北京

# 前 言

我国地震前兆监测和地震预测的探索与实践,已有 35 年的历史。35 年在人类的历史上只是一瞬间,但这 35 年对我国地震事业而言是艰辛开创的年代,也是蓬勃发展的年代。在这 35 年里,我们建立了世界上规模最大的前兆监测网,积累了丰富的观测资料,成功预测了 1975 年 2 月海城  $M_s$  7.3、1976 年 8 月松潘  $M_s$  7.2、1995 年 7 月孟连中缅边界  $M_s$  7.3、1998 年 1 月宁蒗  $M_s$  6.2 及 1999 年 11 月岫岩  $M_s$  5.4 等破坏性地震,在世界地震科学史上留下了光辉的一页。在这 35 年里,我们从土法观测到仪器观测,从模拟记录到数字化记录,从信函报数到自动传输,从人工点图计算到计算机数据处理,一步步地走上了现代化的前兆观测年代。在地震监测与预测的科学实践与观测技术向现代化迈进的进程中,首都圈地区始终是一个最为引人注目的地区,也是处在现代化建设最前沿的地区。

首都圈的概念是 20 世纪 80 年代提出的,90 年代其地域有所扩展。这个地区以首都北京为核心,并向东西扩展。首都圈地区,一般指( $38.5^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$ ,  $114^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ )的范围,包括北京与天津两个直辖市,河北省的唐山、廊坊两个地区及张家口、承德、保定、沧州、石家庄的部分地区,总面积约 15 万  $\text{km}^2$ 。1989 年 10 月山西大同发生  $M_s$  6.1 地震之后,地震界从地震监测与预测的角度,提出了首都圈及其邻近地区的概念,把地震监测与预测工作的范围向西扩展到了  $113^{\circ}\text{E}$ ,向北扩展到了  $42^{\circ}\text{N}$ ,把山西省东北部与内蒙古中南部的部分地区也纳入到工作区内。

在首都圈及其邻近地区,我国已建成了台网密度最大、观测手段最齐全、技术水平最先进的地下流体前兆监测台网。在这个地区,曾发生 1976 年 7 月 28 日唐山  $M_s$  7.8、1989 年 10 月 19 日大同  $M_s$  6.1、1998 年 1 月 10 日张北  $M_s$  6.2 强震以及多个中强地震,不仅检验了台网、手段与技术,而且还积累了大量有科学价值的资料。在这里,诞生了我国第一个水文地球化学台站,建成了我国第一个区域地下水动态观测网,发展出了高精度水温(地热)观测技术、水汞观测技术与断层气观测技术,研制出一批数字化观测仪器。在这里,还培养出一代又一代我国地震地下流体学科的带头人及一大批科技骨干与新一代科技接班人。首都圈地区无疑是我国地震地下流体学科发展的缩影与精华所在。为此,这里的地震地下流体监测与预测的历史与实践是值得认真总结的。

地下流体学科老一代科技工作者们一直把总结首都圈地区的经验与教训作为科学探索的重要内容。在《地震流体地质学概论》(蔡祖煌、石慧馨 1980)、《地震地下水动态及其影响因素分析》(贾化周、杨玉荣 1985)、《地下水微动态研究》(汪成民等 1988)、《水文地球化学预报地震的原理与方法》(张炜等 1988)、《中国地震地下水动态观测网》(汪成民等 1990)、《华北地震水文地球化学研究》(蒋凤亮等 1990)、《水文地球化学地震前兆观测与预报》(张炜等 1992)等一系列专著中,不仅总结了全国,而且重点总结了首都圈地区地下流体前兆监测与地震预测中取得的经验与教训。这些总结,不仅奠定了我国地震地下流体学科的科学基础,而且指导我国地震地下流体科技的深入发展,特别是使首都圈地区的地下流体前兆监测与地震预测的科学探索取得了显著的进步。

在 20 世纪的最后十年里,我国在改革开放方针指导下,各行各业都得到了前所未有的发



展,我国的地震科技也不例外。中国地震局监测预报司先后成功组织了“八五地震短临预报攻关”和“九五地震中短期预报攻关”,与此同时,研制并推广了数字化前兆观测技术。在大发展的潮流中,首都圈地区的地下流体学科也取得了新进展。一方面在前兆监测方面成功研制了数字化的水位仪、水温(地热)仪、测氡仪、测汞仪等,并首先在首都圈地区重点改造了一批台站的地下流体前兆观测技术,使首都圈地区的地下流体前兆监测全面迈入了现代化的新阶段。另一方面在地震预测领域,特别是在首都圈地区震情短临跟踪中,发挥了十分重要的作用,在1998年1月10日张北 $M_s 6.1$ 地震前曾提出过很好的中短期与短临预测意见,进一步显现出地下流体学科在地震预测中的作用与地位。首都圈地区的地震地下流体学科在近十年来技术上的进步、科学上的进展与防震减灾事业中的作用,是很值得深入总结的。这一总结,不仅可以有力地推进21世纪首都圈地区地下流体学科前兆监测与地震预测的科技发展,而且对全国地下流体学科的发展也会有指导与示范的意义。

本书就是基于上述认识而撰写的。全书共分为6章。第1章简要介绍了首都圈地区的地震地质与地震活动背景及地下流体前兆监测与地震预测实践的概况,其中特别体现了作为地震监测与预测人员必须要了解监测预测区的地质-水文地质条件,不仅要了解“构造”,也要了解“建造”,不仅要了解固体介质的状态,而且也要了解其中的“流体特性”,不仅要了解应力-应变,而且要了解流体运动等重要科学思想。第2章分为水位、水温(地热)与油井三个测项,分别介绍了地下流体学科物理测项的基本动态类型及其成因,不仅介绍正常时段的多年趋势动态、年动态、月动态与日动态类型及其影响因素,而且还介绍常见的异常动态类型。第3章分为水氡、水汞、气体三个测项,分别介绍了地下流体学科化学测项的基本动态类型及其成因,介绍了正常时段的多年趋势动态、年动态、月动态类型及其影响因素,介绍了常见的异常动态类型。在第2和第3章中,作者突出了要识别出地震前兆异常,必须首先认识正常动态及其影响因素,不能把正常变化视为异常,也不能把所有的异常全归于地震前兆的科学观点。第4章介绍了典型震例,在对国内与首都圈震例概况进行简述的基础上,突出了1989年10月19日大同 $M_s 6.1$ 和1998年1月10日张北 $M_s 6.2$ 强震的震例;这不仅因为这两个地震是近十多年来发生在该区的最大强震,而且也因为通过这两个震例可以看到首都圈地区地下流体学科前兆监测与地震预测科技的进展。本章同时也介绍了较为典型的其他震例。通过这些震例,我们还可以进一步体会到地下流体异常在地震短临预测中的优势,地壳放气、放热动态监测在地震短临预测中的特殊作用等。第5章介绍了地震预报方法,重点介绍了提取异常的新技术及“九五”科技攻关中发展出的动力学图像演化、水氡变化速率、水位变差及水位阶变序列分析等新的地震预测方法;在介绍这些方面之前,特别强调了异常的调查与落实,指出了地下流体异常的多解性,力图纠正简单地把“以前没有过的变化”视为地震前兆异常的错误倾向。第6章讨论有关地下流体前兆监测与地震预测实践中存在的主要问题及未来的发展方向。由上可见,本书内容较为全面,但又突出重点;层次清晰,章节间衔接合理;特别是有关问题的介绍中都贯穿了一定的科学思想,在力图深化探索的同时推进地震监测与预测的科学实践。

本书以前人工作为基础,广泛吸收了奋战在地震监测与预测第一线的同行们所取得的成果。本书的编写组成员多参加了20世纪创建地下流体学科的艰苦实践,同时又在后十年中作为学科带头人与科技骨干发挥了重要作用,他们有责任总结,也有能力总结。与此同时,编写组还适当吸收了一些新人,他们可能是首都圈地区地下流体学科接班人队伍中的重要成员。因此,本书是首都圈地区地下流体学科的老、中、青三代人共同编写的。具体编写分工如下:第1章,车用太;第2章,曹新来,鱼金子与李一兵;第3章,王吉易,李君英与张培仁;第4章,鱼

金子,曹新来,邵永新,王安滨与车用太;第5章,王吉易,曹新来与邵永新;第6章,车用太。全书由车用太、王吉易、李一兵负责修改,最后由王吉易、鱼金子统稿。本书的编写提纲和书稿修改等工作中,得到地震出版社马兰副编审和气象出版社郭彩丽副编审的指导。《首都圈地下流体监测与地震预测》一书是集体劳动的结晶。

中国地震局陈建民副局长,曾为我国地下流体学科的学术带头人,一直关注地下流体学科的发展,特别为本书写了序。中国地震局监测预报司及有关处室的各位领导,多年来十分支持地下流体学科及其在首都圈地区的监测、预测与研究实践,一直关注本书的出版。因此,《首都圈地下流体监测与地震预测》一书又是各级领导关心与支持的产物。

编写组的全体同志,坚信地震是可以预测的;地下流体学科在地震预测,尤其是短临预测中可以发挥举足轻重的作用;然而地震预测科学探索的路程还很长,需要攻克的难关还很多,我们还需要做长期艰苦的努力。在这样的历史阶段,我们十分希望,本书的出版在我国地震地下流体学科的发展、地震预测的科学探索及防震减灾事业中起到应有的作用。与此同时,我们也必须说明,尽管我们为本书付出了近两年的努力,但由于水平与能力有限,书中难免有错误与不妥之处,恳请读者们提出批评与指正。

本书编写组

2004年3月

# 目 录

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| 前言 .....                    | ( I )  |
| 第 1 章 地下流体监测与地震预测概述 .....   | ( 1 )  |
| 1.1 首都圈地区的地震地质背景 .....      | ( 1 )  |
| 1.1.1 地壳结构 .....            | ( 1 )  |
| 1.1.2 地壳介质 .....            | ( 4 )  |
| 1.1.3 地质构造 .....            | ( 7 )  |
| 1.1.4 水文地质 .....            | ( 10 ) |
| 1.2 首都圈地区的地震活动 .....        | ( 14 ) |
| 1.2.1 地震活动概况 .....          | ( 14 ) |
| 1.2.2 地震活动的时间分布 .....       | ( 15 ) |
| 1.2.3 地震活动的空间分布 .....       | ( 16 ) |
| 1.2.4 未来地震危险性的估计 .....      | ( 17 ) |
| 1.3 地震地下流体前兆监测 .....        | ( 17 ) |
| 1.3.1 地下流体前兆监测简史 .....      | ( 17 ) |
| 1.3.2 地下流体前兆观测项目与观测技术 ..... | ( 19 ) |
| 1.3.3 地下流体前兆台网 .....        | ( 20 ) |
| 1.3.4 数字化观测技术 .....         | ( 27 ) |
| 1.4 地下流体前兆异常与地震预测 .....     | ( 30 ) |
| 1.4.1 地下流体前兆异常 .....        | ( 30 ) |
| 1.4.2 地下流体震例 .....          | ( 32 ) |
| 1.4.3 地震预测的实践 .....         | ( 34 ) |
| 第 2 章 地下流体物理测项基本动态 .....    | ( 36 ) |
| 2.1 水位的基本动态 .....           | ( 36 ) |
| 2.1.1 水位动态类型 .....          | ( 36 ) |
| 2.1.2 水位动态的影响因素 .....       | ( 44 ) |
| 2.1.3 水位异常动态 .....          | ( 48 ) |
| 2.2 水温的基本动态 .....           | ( 51 ) |
| 2.2.1 水温的正常动态 .....         | ( 52 ) |
| 2.2.2 水温动态的影响因素 .....       | ( 57 ) |
| 2.2.3 水温的异常动态 .....         | ( 63 ) |
| 2.3 油井的基本动态 .....           | ( 64 ) |
| 2.3.1 油井动态与地震关系 .....       | ( 64 ) |
| 2.3.2 油井的正常动态 .....         | ( 65 ) |
| 2.3.3 油井的异常动态 .....         | ( 66 ) |



|            |                               |              |
|------------|-------------------------------|--------------|
| 2.3.4      | 井管突升与油井自喷现象                   | (69)         |
| <b>第3章</b> | <b>地下流体化学测项基本动态</b>           | <b>(74)</b>  |
| 3.1        | 水氡的基本动态                       | (74)         |
| 3.1.1      | 水氡的正常动态                       | (74)         |
| 3.1.2      | 水氡的异常动态                       | (83)         |
| 3.2        | 水汞的基本动态                       | (86)         |
| 3.2.1      | 水汞的正常动态                       | (86)         |
| 3.2.2      | 水汞动态的影响因素                     | (90)         |
| 3.2.3      | 水汞的异常动态                       | (92)         |
| 3.3        | 气体的基本动态                       | (95)         |
| 3.3.1      | 气体观测概述                        | (95)         |
| 3.3.2      | 气体的正常动态                       | (95)         |
| 3.3.3      | 气体动态的影响要素                     | (100)        |
| 3.3.4      | 气体的异常动态                       | (103)        |
| <b>第4章</b> | <b>地下流体的典型震例</b>              | <b>(105)</b> |
| 4.1        | 震例概述                          | (105)        |
| 4.1.1      | 国内震例中的地下流体异常                  | (105)        |
| 4.1.2      | 首都圈及其邻近地区的地下流体震例              | (106)        |
| 4.2        | 大同地震的地下流体异常                   | (107)        |
| 4.2.1      | 大同地震概述                        | (107)        |
| 4.2.2      | 地下流体监测与异常概况                   | (108)        |
| 4.2.3      | 地下流体的典型异常                     | (109)        |
| 4.2.4      | 地震预测实践及其启示                    | (112)        |
| 4.3        | 张北地震的地下流体异常                   | (113)        |
| 4.3.1      | 张北地震概述                        | (113)        |
| 4.3.2      | 地下流体观测与异常概况                   | (113)        |
| 4.3.3      | 地下流体的中长期异常                    | (115)        |
| 4.3.4      | 地下流体的中期异常                     | (119)        |
| 4.3.5      | 地下流体的短期异常                     | (124)        |
| 4.3.6      | 地下流体的临震与同震异常                  | (126)        |
| 4.3.7      | 张北地震的震前预测                     | (127)        |
| 4.4        | 其他地震的地下流体异常                   | (128)        |
| 4.4.1      | 1996年5月3日包头西 $M_S$ 6.4 地震     | (128)        |
| 4.4.2      | 1995年10月6日唐山 $M_S$ 5.0 地震     | (132)        |
| 4.4.3      | 1996年12月16日顺义 $M_S$ 4.0 地震    | (133)        |
| 4.4.4      | 1997年5月25日张家口市西南 $M_S$ 4.2 地震 | (134)        |
| 4.4.5      | 2002年4月22日隆尧 $M_S$ 4.8 地震     | (135)        |
| <b>第5章</b> | <b>地下流体学科地震预报的一般方法</b>        | <b>(138)</b> |
| 5.1        | 地下流体学科地震预报方法概述                | (138)        |

|       |                         |       |
|-------|-------------------------|-------|
| 5.1.1 | 地下流体异常可靠性调查             | (138) |
| 5.1.2 | 地下流体地震前兆异常的综合判定         | (140) |
| 5.1.3 | 地下流体学科预测地震三要素的经验方法      | (141) |
| 5.1.4 | 地下流体学科预测地震的数学分析方法       | (142) |
| 5.2   | 地下流体动态的图像演化法            | (144) |
| 5.2.1 | 地下流体变化程度动态图像的生成         | (145) |
| 5.2.2 | 强震危险区预测的标志和方法           | (148) |
| 5.2.3 | 运用地下流体动态演化图像对强震危险区预测的检验 | (149) |
| 5.3   | 地下流体学科发震的时间预测法          | (149) |
| 5.3.1 | 水氡变化率法                  | (151) |
| 5.3.2 | 水位变差法                   | (155) |
| 5.3.3 | 水位序列异常分析法               | (159) |
| 5.4   | 地下流体学科的震情跟踪预报           | (163) |
| 5.4.1 | 震情跟踪预报工作简述              | (163) |
| 5.4.2 | 地下流体震情跟踪预报的任务与内容        | (163) |
| 5.4.3 | 张北 $M_s 6.2$ 地震的跟踪预测实例  | (166) |
| 第 6 章 | 地下流体监测与预测中的问题与展望        | (170) |
| 6.1   | 前兆监测中的问题与展望             | (170) |
| 6.1.1 | 台站现状与问题                 | (170) |
| 6.1.2 | 数字化技术改造与有待完善的技术         | (173) |
| 6.1.3 | 观测技术发展的展望               | (174) |
| 6.2   | 地震预测中的问题与展望             | (181) |
| 6.2.1 | 地震预测的科学思路               | (181) |
| 6.2.2 | 地震前兆异常的可靠性研究            | (184) |
| 6.2.3 | 前兆异常场的研究                | (185) |
| 6.2.4 | 关于映震灵敏区、灵敏井与灵敏测项的研究     | (186) |
| 6.2.5 | 发挥流体学科在地震预测中的优势问题       | (189) |
| 参考文献  |                         | (191) |

# 第 1 章

## 地下流体监测与地震预测概述

### 1.1 首都圈地区的地震地质背景

任何地震的孕育与发生及其前兆异常的显现,都是以一定的地震地质条件为背景。因此,地震前兆的监测与预测,无论在何时何地,都必须了解地震地质条件。本书中所指的地震地质的含义较广泛,泛指地壳结构及其组成物质,特别是指上地壳的构造格架与物质组构。为此,将分别介绍首都圈地区的地壳结构、大地构造单元、各单元的地层与岩性及岩浆活动、地质构造、地下水及其系统等地震地质问题。

#### 1.1.1 地壳结构

##### 1.1.1.1 地壳厚度

地壳是地球的坚硬外壳,其厚度系指地表面到莫霍面之间的垂直距离。莫霍面是地球中地壳与地幔的分界面,在该界面上地震波速度发生突变。在华北地区,莫霍面上、下纵波速度( $V_p$ )由  $7.0\sim 7.1\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  突然上升到  $8.0\sim 8.1\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

华北地区的地壳厚度,是很多地质与地球物理学家一直关注的问题,而且进行了多次探测与计算。根据深地震探测并结合重力反演得到的厚度(张先康 1998)和重力异常资料反演得到的厚度(卢造勋等 2001)如图 1.1 所示。图中曲线为厚度等值线,数值为厚度值。

由图 1.1 可见,首都圈地区的地壳厚度有如下特征:

(1)总体上,由西北向东南变薄。晋冀蒙交界地区最厚,为  $42\text{ km}$ ;渤海海中最薄,为  $28\text{ km}$ 。

(2)地壳底界面的形态有变化,大体上可分为三区:一是中央条带,即以承德—北京—保定为中心线的两侧地区,地壳厚度由西北向东南均匀减薄;二是中央条带之西北区,地壳厚度表现为南、北厚,中部薄,但相差不大;三是中央条带之东南区,地壳厚度变化多端,多个增厚与减薄小区相间发育,小区的走向在陆地呈 NE 向,但在海中或沿海呈 NW 向。

(3)在渤海—张家口之间,存在 NW 向的地壳增厚带。

##### 1.1.1.2 地壳的物性结构

首都圈地区的地壳,按照速度结构一般可分为上、中、下三层。

##### (1)地壳速度结构

上地壳的厚度为  $10\sim 13\text{ km}$ ,又可细分为上、下二层。上层厚度  $1\sim 3\text{ km}$ ,速度一般小于  $4\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,变化梯度大;下层的速度  $5.2\sim 6.2\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在平原区偏高( $6.2\sim 6.5\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ),在

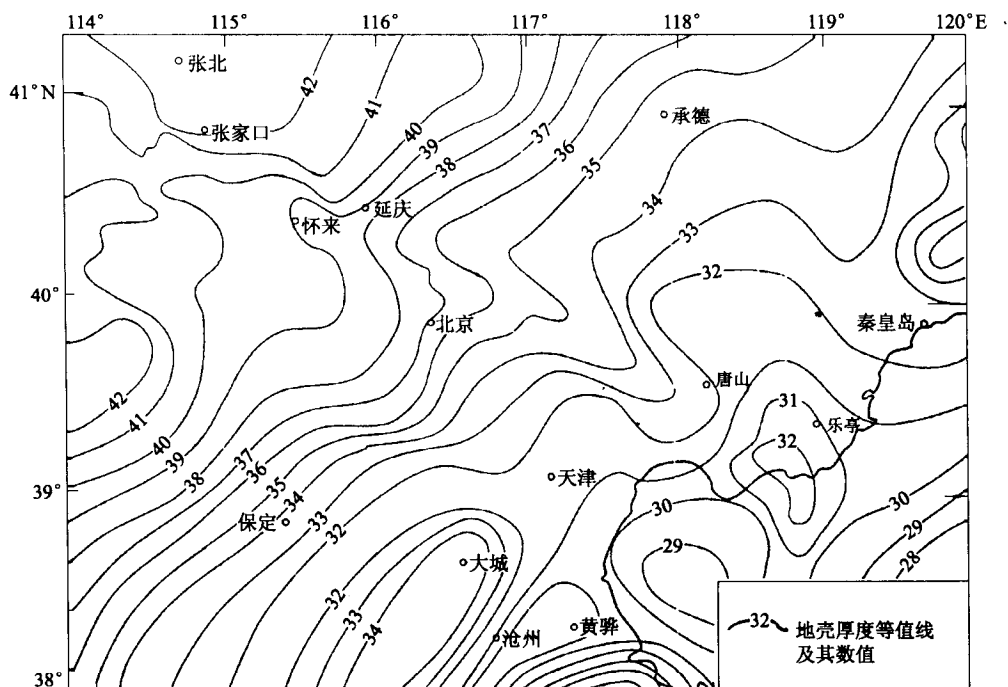


图 1.1 首都圈地区地壳厚度等值线图(单位:km)

(据张先康(1998)和卢造勋等(2001)等资料)

山前地带偏低( $5.6 \sim 6.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )。上地壳的上层,主要由中新世与古生代的沉积层组成;上地壳的下层主要由古老的变质岩结晶基底组成。

中地壳的厚度为 10 km 左右,其速度一般为  $6.2 \sim 6.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。中地壳速度结构的显著特征是发育有低速层,其内速度较外围低 2%~5%,水平方向上断续状展布。

下地壳的厚度约 10 km,但山区偏大,其波速一般为  $6.5 \sim 7.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。也可分为上、下二层,上层中也发育低速层。

在首都圈内的不同地区,地壳分层、各层的结构及低速层的发育特征均有所不同。图 1.2a 为三组地壳速度结构剖面图。

## (2) 地壳电性结构

在首都圈地区,通过大地电磁测深技术,调查了该区的电性结构。调查结果如图 1.2b 所示。从图中可见,壳内电性结构表现出四层结构:

- 地壳表层(相当于上地壳上层)为高导低阻层,电阻率值为几至十几欧姆米,其厚度变化较大,主要由新生代沉积层组成;
- 地壳上部高阻层(相当于上地壳下层),电阻率值为几百至几千欧姆米,主要由古生界沉积岩与古老的变质岩系组成;
- 壳内高导层(相当于中地壳),埋深十几至二十多千米,电阻率值为几至十几欧姆米,与壳内低速层的分布一致;
- 地壳下部高阻层(相当于下地壳),厚度变化范围较大,电阻率大于万欧姆米。

## (3) 地壳密度结构

根据重力正演拟合得出的地壳密度结构,表现出不均匀性,特别是在平原区上地壳上层中

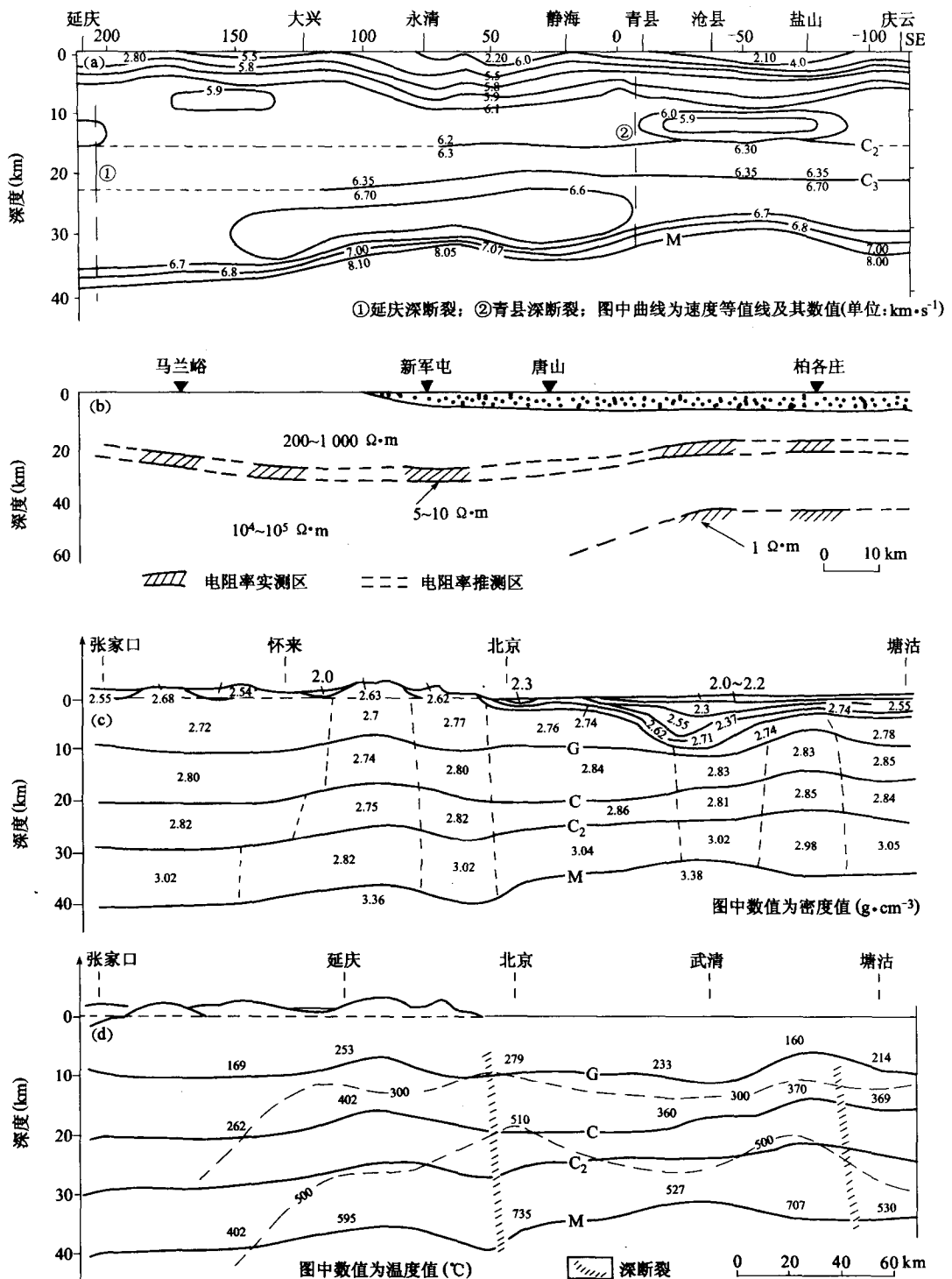


图 1.2 首都圈地区地壳物性结构剖面图(单位: km)

(a) 延庆—永清—沧县速度结构剖面图(据孙武成等 1989); (b) 马兰峪—唐山—柏各庄电性结构剖面图(据刘国栋等 1989); (c) 张家口—北京—塘沽密度结构剖面图(据殷秀华 1993); (d) 张家口—北京—塘沽热结构剖面图(据吴宗霖 1993)

表现更为明显,如图 1.2c 所示。在上地壳的上层,新生代地层的密度为  $2.0\sim 2.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,中生代至上古生代地层的密度为  $2.55\sim 2.62\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,下古生代地层的密度为  $2.7\sim 2.75\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,前寒武纪地层的密度为  $2.63\sim 2.83\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。地壳三层的密度分别是,上地壳为  $2.74\sim 2.85\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,中地壳为  $2.75\sim 2.91\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,下地壳为  $2.92\sim 3.07\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。在水平方向上,沉积平原区的密度高于基岩山区,沉积平原区内基底相对隆起区的密度大于相对凹陷区。

(4)地壳热结构

根据热流测定的数据,结合地质-地球物理资料及岩石热导率、生热率等参数可计算出不同地区不同深度的温度值,再依此建立地壳热结构,其结果如图 1.2d 所示。由图可见,山地的地壳温度低于平原区,平原区内的基底相对隆起区的温度高于凹陷区。

综上所述,首都圈地区的地壳厚度与结构变化有一定的规律性,厚度上由西北向东南减薄;地壳的速度、电性、密度及温度等物理参数上分层性较清楚,但山区与平原区、平原区内的隆起区与凹陷区的物理参数表现出一定的差异性。这种差异性,控制着首都圈地区的地震活动性,如中强震多发生在壳内高导低速层之上,中等以上地震多发生在热隆区,温度高于  $500^{\circ}\text{C}$  的部位不发生 3 级以上地震等等。

1.1.2 地壳介质

1.1.2.1 地层与岩性

地层是地壳上层的主要物质组成,也是地震前兆监测的介质环境。目前的前兆监测中存在“重构造、轻建造”的倾向,对观测环境中的介质条件重视不够,甚至不予考虑。这种倾向是需要纠正的。为此,这里我们介绍一下首都圈地区的地层与岩性。

首都圈地区的地层与岩性,是典型的华北型地层,太古代—上古生代全区发育,但到中生代之后以北京为界,东、西两区地层与岩性表现出一定的差异。现把首都圈地区的主要地层岩性,简要地概括于表 1.1 中。

表 1.1 首都圈地区地层岩性

| 界<br>(代号)                | 系<br>(代号)  | 统<br>(代号)                 | 组<br>(代号)   | 主 要 岩 性                               | 厚 度<br>(m) |
|--------------------------|------------|---------------------------|-------------|---------------------------------------|------------|
| 新生界<br>(K <sub>2</sub> ) | 第四系<br>(Q) | 全新统<br>(Q <sub>4</sub> )  |             | 冲、洪、风、湖积的砾石、砂黏性土、淤泥等                  | 50~100     |
|                          |            | 上更新统<br>(Q <sub>3</sub> ) |             | 冲、洪积黄色、黄褐色亚黏土,含砾石透镜体                  | 5~136      |
|                          |            | 中更新统<br>(Q <sub>2</sub> ) |             | 残坡、冲洪积浅紫红色、红色亚黏土夹砂砾石,局部有水平或交错层理或火山喷出岩 | 10~150     |
|                          |            | 下更新统<br>(Q <sub>1</sub> ) | 泥河湾组        | 湖相灰黄、黄绿、灰白色黏土、粉砂质黏土、砂砾石、局部夹石膏层        | 80~100     |
|                          | 第三系<br>(R) | 上新统<br>(N <sub>2</sub> )  | 三趾马红土       | 冲、洪积红色黏土、砂砾石、生物灰岩及晚期喷出岩               | 102~160    |
|                          |            | 中新统<br>(N <sub>1</sub> )  | 汉诺坝组<br>— — | 玄武岩,局部夹有砾石、黏土、褐煤层                     | 200~454    |
|                          |            | 渐新统<br>(E <sub>1</sub> )  | 长辛店组        | 红色黏土岩、砂岩、砂砾岩互层,中间夹煤                   | 50~300     |



续表

| 界<br>(代号)                | 系<br>(代号)  | 统<br>(代号)                 | 组<br>(代号)                  | 主 要 岩 性                                                                                 | 厚 度<br>(m)  |
|--------------------------|------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 中生界<br>(M <sub>2</sub> ) | 白垩系<br>(K) | 下统<br>(K <sub>1</sub> )   | 土井子组<br>(K <sub>1t</sub> ) | 山前河床相沉积,上部为紫红色、灰褐色、黄褐色巨厚层中细粉砂岩、石英砂岩;下部为黄色、红褐色巨厚层砂岩夹少量砖红色砂岩、砂质黏土岩                        | 530~1 165   |
|                          |            |                           | 青石粒组<br>(K <sub>1q</sub> ) | 含煤地层。顶部为杂色页岩与石英砂岩;上部为灰白色碳质页岩、砂质页岩、细砂岩互层,含煤;中部为灰色层纹状细砂岩、砂质页岩,含煤;底部为灰白色中粗长石砂岩夹砂质页岩、黏土质页岩等 | 77~359      |
|                          | 侏罗系<br>(J) | 上统<br>(J <sub>3</sub> )   | 南店组<br>(辛庄一大灰厂组)           | 河流相,砾岩、凝灰质砂粉砂质页岩,偶夹流纹质凝灰岩                                                               |             |
|                          |            |                           | 张家口组<br>(东岭台组)             | 上部为凝灰岩与流纹岩;中部为流纹岩、粗面岩与石英斑岩;下部为凝灰质角砾岩、凝灰岩夹少量流纹岩                                          | 1 669~2 370 |
|                          |            | 中统<br>(J <sub>2</sub> )   | 后城组                        | 紫红、砖红色砾岩、砂砾岩、凝灰质粉砂岩夹少量流纹岩、粗面岩                                                           | 795~3 530   |
|                          |            |                           | 髻髻山组                       | 安山岩、安山质集块岩、安山质角砾岩、凝灰质砂页岩、砾岩夹页岩                                                          | 2 128       |
|                          |            |                           | 九龙山组                       | 砂岩、凝灰质砂岩夹砾岩                                                                             | 284         |
|                          |            | 下统<br>(J <sub>1</sub> )   | 下花园组                       | 砂砾岩、砾岩、砂岩、黏土岩夹煤                                                                         | 185~1 130   |
|                          |            |                           | 南大岭组                       | 安山岩、凝灰质砂岩、砂质页岩                                                                          | 268         |
|                          |            |                           | 杏石口组                       | 砾岩、砂岩夹少量砂质页岩                                                                            | >36         |
|                          |            | 双泉统                       |                            | 杂色凝灰质砂岩、砂质页岩、页岩互层,中间夹有煤层与火山岩,底部为底砾岩                                                     | 150~200     |
|                          | 二叠系<br>(P) | 石盒子统<br>(P <sub>2</sub> ) | 红庙岭组                       | 以黄白色及棕黄色粗粒及细粒石英砂岩为主,铁质胶结,风化呈赤红色,偶夹紫色及灰黑色页岩与砾岩                                           | 50~150      |
|                          |            |                           | 上杨家电煤系                     | 红色及黄色砂岩夹黑色页岩                                                                            | 50~60       |
|                          |            | 山西统<br>(P <sub>1</sub> )  | 中杨家电煤系                     | 以砾岩为主,夹黄棕色及红色砂岩、薄层黑色页岩与煤层                                                               | 197~208     |
|                          | 石炭系<br>(C) | 太原统<br>(C <sub>3</sub> )  | 下杨家电煤系                     | 灰色及黑色页岩夹棕色及深绿色砂岩,含5~6层煤,页岩中含黄铁矿结核及铁质结核                                                  | 45~111      |
|                          |            | 本溪统<br>(C <sub>2</sub> )  |                            | 灰色及黑色页岩为主,夹杂色钙质页岩,顶部有煤层,底部有泥质灰岩与铝土页岩                                                    | 70~210      |
|                          | 奥陶系<br>(O) | 马家沟统<br>(O <sub>2</sub> ) |                            | 暗灰色无层理灰岩,质纯坚硬,局部含燧石,夹有白云岩或白云质灰岩                                                         | 295         |
|                          |            | 西北涧统<br>(O <sub>1</sub> ) | 北岭子灰岩                      | 块状暗色灰岩夹灰绿色页岩,灰岩中夹燧石层                                                                    | 110         |
|                          |            |                           | 十八盘灰岩                      | 页状灰岩,底部含扁豆状结核                                                                           | 132         |

续表

| 界<br>(代号)                | 系<br>(代号)                 | 统<br>(代号)                | 组<br>(代号) | 主 要 岩 性                                           | 厚 度<br>(m)  |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------|---------------------------------------------------|-------------|
| 中生界<br>(M <sub>2</sub> ) | 寒武系<br>( $\epsilon$ )     | 炒米店统<br>( $\epsilon_3$ ) | 桃园组       | 顶部为厚层灰岩,中部为竹叶状灰岩,下部为页状灰岩,底部为鲕状、竹叶状与层状灰岩           | 64          |
|                          |                           |                          | 崮山组       | 黑色及灰色页状灰岩                                         | 9           |
|                          |                           | 张夏统<br>( $\epsilon_2$ )  |           | 深蓝色、灰黑色鲕状灰岩,夹灰色与绿色页岩,底部夹层发育                       | 70~100      |
|                          |                           | $\epsilon_1$             | 馒头组       | 紫色、绿色页岩及砂质页岩,上夹灰岩,下夹砂岩                            | 120         |
|                          | 青白口系<br>(Z <sub>q</sub> ) |                          | 景儿峪组      | 上部为白色灰岩;中部为紫、红、绿色页岩;下部为含铁砂岩                       | 230         |
|                          |                           |                          | 下马岭组      | 顶部为绿色页岩夹砂质灰岩;上部为黑色砂质灰岩;中部为绿色、灰绿色页岩及板岩;下部为灰色含黄铁矿页岩 | 150~300     |
|                          | 蓟县系<br>(Z <sub>j</sub> )  |                          | 铁岭组       | 以深灰色纯灰岩为主,偶夹燧石薄层红色页岩,底部为黑色、红色砂岩及石英岩               | 200         |
|                          |                           |                          | 洪水庄组      | 灰绿、灰色、灰黑色砂质页岩                                     | 50          |
|                          |                           |                          | 雾迷山组      | 砂质层状灰岩,富含燧石层,偶夹薄层红色页岩                             | 1 500       |
|                          |                           |                          | 杨庄组       | 黄灰色砂页岩为主,胶结疏松,具波痕,顶部时有赤铁矿透镜体,底部有条带状砂岩             | 130~190     |
|                          | 长城系<br>(Z <sub>ch</sub> ) |                          | 高于庄组      | 上部为暗灰色硅质灰岩;中部为灰白色板状泥质灰岩及页岩;下部为砂质灰岩                | 1 000       |
|                          |                           |                          | 大红峪组      | 浅色与红色石英岩,具交错层,有时顶部夹灰岩或页岩,上部含鲕状赤铁矿                 | 150~400     |
|                          |                           |                          | 串岭沟组      | 上部为厚层灰岩,下部为黑色页岩、板岩及灰色砂岩                           | 100         |
|                          |                           |                          | 常州沟组      | 白色石英岩为主,有时下部有砂岩、砾岩                                | 50~300      |
|                          |                           |                          |           | 片麻岩、变粒岩、角闪岩、大理岩                                   | 16 000      |
|                          | 桑干群<br>(A <sub>m</sub> )  |                          |           | 主要为花岗片麻岩及角闪片麻岩,其中含伟晶岩脉、石英脉等;有些地区发育有各种片岩、石英岩、大理岩等  | 2 791~4 714 |

注:据中国区域地层表简化。

中、新生代地层,在北京及其西部地区与北京东部地区有一定差异,主要差异是北京以东地区的侏罗系与白垩系不很发育,北京以西地区第三系地层不发育。

### 1.1.2.2 岩浆活动与岩浆岩

在漫长的地质历史中,首都圈地区的岩浆活动一直较为活跃,特别是在首都圈的西部与北部地区尤为活跃。在不同的地质历史时期,都有不同程度的活动,特别是中生代活动十分强烈。岩浆活动的方式,既有侵入活动,也有喷出活动,可分为几个活动旋回,每个旋回均以喷出活动开始,以中深层侵入活动结束。

在上述岩浆活动中,生成了产状各异、岩性多变的各类岩浆岩。

首都圈地区的岩浆活动及其岩体产状与岩性等,简要概括于表 1.2 中。

表 1.2 首都圈地区岩浆活动与岩浆岩简表

| 岩浆活动期 | 活动时代           | 活动旋回 | 主 要 岩 石               | 年龄(亿年)       | 岩 体 产 状      |
|-------|----------------|------|-----------------------|--------------|--------------|
| 喜山期   | $N_2 \sim Q_2$ | 九    | 玄武岩、辉绿岩               |              | 岩被、岩脉        |
| 燕山期   | $K_1$          | 八    | 闪长岩、花岗岩、安山岩           | 0.786~21.384 | 岩株、岩枝、岩基、岩被  |
|       | $J_3$          | 七    | 花岗岩、流纹岩、安山岩           |              | 岩株、岩盖、岩颈、熔岩流 |
|       | $J_2$          | 六    | 正长岩、花岗岩、辉长岩、闪长岩、安山岩   | 1.71         | 岩株、熔岩流       |
|       | $J_1$          | 五    | 花岗岩、安山岩               |              | 岩株、岩被        |
| 印支期   | T              | 四    | 花岗岩、辉石(正长)岩           | 2.06~22.22   | 岩株、岩盖        |
| 华力西期  | $P_1$          | 三    | 正长岩、花岗岩、闪长岩、辉石岩、橄榄岩   | 2.58~22.66   | 岩基、岩株、熔岩流    |
| 东安期   | $Z_c$          | 二    | 凝灰岩                   |              | 层状           |
| 五台期   | $P_1 \sim A_1$ | 一    | 伟晶岩、正长岩、花岗岩、变闪长岩、变角闪岩 |              | 岩脉、岩株、岩床     |

首都圈地区的岩浆活动,在新生代时期仍较频繁。第三纪以来在广大的地区仍有基性岩浆的多次喷发活动,在松散层与半胶结的碎屑岩层中发育了多层玄武岩夹层或在其上生成了玄武岩盖层。

### 1.1.2.3 地壳的岩石组成

根据深源岩石学研究、地球物理探测以及高温高压下波速测试对比结果,建立了首都圈地区地壳介质的岩石学模型。大体上以太行山为界,东、西二个地区的介质组成有所差异,尤其是中、下地壳的介质差异较为明显。

上地壳的顶部为沉积盖层,其下部为绿片岩相,部分为低角闪岩相,主要由中酸性成分的变粒岩、绿粒片岩类和绢云片岩类、板岩、千枚岩、大理岩、石英岩以及花岗岩组成。对变粒岩与花岗岩测得波速分别为  $5.9 \sim 6.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $5.87 \sim 6.15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与该区上地壳波速  $5.2 \sim 6.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  基本相符。

中地壳为角闪岩相。在东部地区,主要由中酸性成分的混合岩化的各种片麻岩、片岩、变粒岩和少量角闪岩以及石英闪长岩、花岗闪长岩组成;其中,片麻岩测速得  $6.0 \sim 6.21 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,斜长角闪岩测速得  $6.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,石英闪长岩为  $6.41 \sim 7.49 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ;与该层的实际波速  $6.2 \sim 6.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  也相当。在西部地区,主要由中酸性至酸性的混合岩化的各种片麻岩、浅粒岩、变粒岩、少量大理岩和斜长角闪岩以及花岗闪长岩组成。

下地壳为麻粒岩相。在东部地区,下地壳上层主要由中性成分的麻粒岩和紫苏花岗岩等组成,下层主要由基性麻粒岩为主,夹有透镜状蛇纹岩化的橄榄岩;中性麻粒岩速度为  $6.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,基性麻粒岩速度为  $6.9 \sim 7.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与下地壳速度  $6.5 \sim 7.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  相当。在西部地区,以中酸性片麻岩、浅粒岩为主,其速度为  $6.7 \sim 6.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 1.1.3 地质构造

### 1.1.3.1 大地构造单元

在岩石圈构造上,首都圈地区处于黑龙江亚板块与华北亚板块交界带的南区(马杏垣等 1989)。

这个地区从太古代至新生代第四纪,历经 30 亿年以上的地质发展历史。其演化史大致可