

地震科学联合基金会资助

Underground Fluids and Earthquake

地震地下流体学

车用太 鱼金子等 著

气象出版社

地震科学联合基金会资助

地震地下流体学

车用太 鱼金子 等著

气象出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震地下流体学/车用太等著. —北京:气象出版社,2006.8

ISBN 7-5029-4077-4

I. 地… II. ①车…②鱼… III. 地下水-地震观测 IV. P315.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 140092 号

地震地下流体学

Dizhen Dixia Liutixue

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

电 话: 总编室 010-68407112 发行部 010-62175925

责任编辑: 郭彩丽 顾仁俭

终 审: 黄润恒

封面设计: 王 伟

责任技编: 都 平

责任校对: 王瑞民

印 刷 者: 北京中新伟业印刷有限公司

发 行 者: 气象出版社

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 33

字 数: 844.8 千字

版 次: 2006 年 8 月第 1 版

印 次: 2006 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1—1000

定 价: 90 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等, 请与本社发行部联系调换

序

《地震地下流体学》一书行将付梓，车用太教授嘱我为其作序，我不揣冒昧，慨然允诺。这不仅是因为车用太教授和我曾于1968年8月至1970年1月间作为中国科学院的研究生共同下放至天津南郊解放军某部农场劳动锻炼，且由于我们的姓名呼唤起来甚为接近而常被错认，并演绎成一些倍感亲切的趣事佚闻，因此成为朋友，三十多年来一直保持着友好往来；更因为是我始终认为地震科学中“地下流体”是必须予以特别关注，并不断加强与深化研究的领域——无论是研究地震的孕育与发生过程，还是进行地震前兆的监测与地震预测的科学探索，都离不开地下流体科学的发展。

车用太与鱼金子教授伉俪，在地震地下流体台网建设、地下流体动态监测与研究，以及地震预测探索的实践中共同奋战了数十年。他们长期向老一代地下流体学科的专家学习，认真吸取国内外相关领域的先进理论与方法，不断总结自己的科学实践，认真思考，努力创新，积累了丰富的经验，提出了一些新的思想，退休之后潜心著述，写就了《地震地下流体学》一书。

《地震地下流体学》是国内外第一部系统总结地震地下流体学的专著。该书不仅系统总结了我国地震地下流体学学科形成与发展的历程，还介绍了很多相关领域国内外近十年来的新进展，提出了很多具有科学新意的观点和认识，如地壳硬夹层孕震与流体促震假设，地下流体前兆的源兆、场兆与远兆的观点，地下流体前兆机理存在信息的生成、传递与表现三个环节的认识，地下流体前兆有应力应变类异常与深部物质上涌类异常两类不同成因的前兆，等等。该书还专门介绍了台网优化、观测技术现代化、台站建设规范化及台站观测环境保护等台网建设中的重要问题。在利用地下流体异常进行地震预测方面，作者充分肯定了地震预测实践取得的成功进展，与此同时，还实事求是地指出了存在的、不可忽视的问题，特别是强调了异常的“多解性”，以及异常调查与落实的重要性。这些认识与观点，凝聚着作者数十年来在地震地下流体学领域辛勤耕耘的汗水，闪烁着创新求实精神的光芒，无疑会有助于我国地震前兆监测与地震预测科学技术的进步，有益于防震减灾事业的发展。

我衷心祝贺《地震地下流体学》的出版发行。希望本书得到相关领域更多读者的关注，特别是得到从事地震地下流体学研究的年轻读者的关注，使本书奉献给读者的新的思想，新的启迪，薪火相传，从而推动地震地下流体学科的发展，为我国的防震减灾事业做出应有的贡献。

陈运泰

2005年8月1日

注：陈运泰教授为著名地震学家和地球物理学家，中国科学院院士，中国地震学会前理事长，中国地震局地球物理研究所名誉所长，北京大学地球科学学院院长。

前言

(一)

地震地下流体学科是一门新兴的科学。她是在地震监测预报的实践中形成与发展起来的。她的主要任务是研究破坏性地震的监测与预报的理论和办法,为防震减灾事业服务,但又不局限于监测与预测,她还研究地壳中的流体及其在地震孕育与发生过程中的作用,研究与地壳动力过程有关的地下流体问题。

地震地下流体学的形成与发展过程,经历了近40年的时间。在几十年的时间里,由认识地震与地下水的关系开始,布设、扩展与完善地下水动态观测网,开展地下水动态与水文地球化学动态的观测,积累观测资料与震例,研究地下水动态的特征及其异常与地震的关系,建立利用地下水异常预测未来地震发生时间、地点与强度的方法;拓展观测的领域,研究新的观测技术,把地下水观测与研究扩展到地下流体观测与研究;引进国外地下水动态映震的理论与吸取国内其他学科映震的理论,终于发展成这一门新的学科。

地震地下流体学的前身是地震流体地质学(蔡祖煌、石慧馨1980)、地下水微动态研究(汪成民等1988)、地震水文地质学(高名修、车用太1989)、地震地球化学(蒋凤亮等1989b)、地震水文地球化学(张炜等1992)等。地震地下流体学的专业基础是水文地质学与水文地球化学,还涉及到地球物理学、地震地质学、地热学、分析化学、无线电技术与计算机技术等其他学科。由此可见,地震地下流体学是以多学科为基础的边缘学科。

这个学科的形成与发展,是我国地震地下流体学界几代人奋战的结果。为这个学科的形成与发展做出过努力的人员有成千上万,上有敬爱的周恩来总理与著名地质学家李四光教授的鼓励与支持,很多老一代专家的创业,其中代表性的人物有蔡祖煌、汪成民、张炜、贾化周、蒋凤亮等,也有刚刚退休的一批专家,其中代表性的人物有李宣瑚、王铁城、杨玉荣、王吉易、万迪堃、付子忠、张昭栋等,还有正在这个领域继续奋战的刘耀炜、陈华静、黄辅琼等年轻的一代。在这个学科的形成与发展过程中,还得到过很多科学家与专家的支持与指导,特别是丁国喻院士、马宗晋院士、马瑾院士、陈运泰院士、许绍堃院士、陈鑫连教授、梅世蓉教授、郭增建教授、张国民教授、高文学教授等。因此,地震地下流体学是我国地震科技界几代人共同创建与培育起来的。

我们是20世纪80年代初正式加入到地震地下流体学科的创立与发展潮流中的。二十多年来,我们与老一代专家和新一代专家共同奋战,虚心向老一代专家们学习,深入地地震地下流体监测与地震预测的实践中,努力探索,不断开拓,与老中青三代专家们共同建成了地震地下流体观测台网,共同进行了清理攻关(1982—1985)、实用化攻关(1986—1990)、地震预报实用化攻关(1991—1995)、中短期预报攻关(1996—2000)等重要的科学实践,共同承担了地下流体台站数字化改造(1996—2000)与地下流体网络工程建设

(2002—2007) 等重大的工程建设。2004 年退休之后, 回顾我国地震地下流体学科的发展历史, 我们整理了积累的资料, 进一步吸取了众多专家们的研究成果, 进行了科学的总结与提高, 编写出这本《地震地下流体学》。

(二)

《地震地下流体学》由两部分内容组成。

第一部分是地震地下流体学科的专业理论基础, 包括第 1 章至第 7 章, 简要介绍了与本学科密切相关的水文地质学、水文地球化学、岩石力学与地质热力学领域的基本概念与基本理论, 特别介绍了地壳深部的流体及流体对岩石和岩体变形、构造活动及地壳应力场的影响。

第二部分是地震地下流体学的专论, 包括第 8 章至第 12 章, 是本书的重点。第 8 章系统介绍地下流体与地震活动的关系, 其中包括地下热流体活动对不同震级的地震活动的控制作用, 地下流体在地壳垂直剖面上的活动及其对震源深度的控制作用, 强震的周期性活动与地下流体多期活动性的关系, 人类与流体作用有关的工程活动引发地震活动的史例, 进而提出了说明地下流体在地震孕育与发生过程中的“地壳硬夹层孕震与流体促震的假设”。第 9 章系统介绍地下流体动态观测台网, 主要包括台网布局、观测技术、台站建设与台站观测环境保护等; 观测技术中除简要介绍模拟观测技术外, 重点介绍数字化观测技术; 台站建设中重点介绍了台址遴选与观测井建设, 试图把台站建设规范化; 观测环境保护是关系到地下流体台站今后生存与发展的重要问题, 因此还利用较大篇幅介绍了环境干扰的评估理论与方法、台站与干扰源间的最小距离的规定等。第 10 章分别介绍了各类测项的动态类型与特征, 明确了正常动态、前兆异常动态与干扰异常动态的概念并分别举出典型实例, 特别强调了正常动态类型与特征的认识、异常动态成因的多解性及其调查与落实的必要性与重要性。第 11 章在充分肯定地震预测实践取得的重要进展的基础上指出了存在的问题, 介绍了地下流体动态异常的识别方法、形成机理及地震预测的方法, 所介绍的预测方法包括前人研究成果, 但重点介绍近十年来出现的新的预测思路与方法。第 12 章简要介绍地下流体动态信息的开发与利用, 包括地质-水文地质参数的求算、区域应力场与断层现今活动性的监测、断层气与隐伏断裂探测等, 此外还介绍了地下流体对其他地球物理观测信息的影响等。

全书近 80 万字, 包括约 300 幅图, 篇幅较大, 涉及的内容较多, 基本上包括了地震地下流体学的各个部分, 但不涉及学科管理, 也没有系统介绍观测技术规范等操作技术。这是因为, 本书的定位是在“科学与技术”的平台上。

(三)

本书于 2001 年开始酝酿, 提出了编写提纲并得到了地震科学联合基金会的支持, 但因为时间安排与出版经费上的困难, 一直推迟到 2004 年才开始正式启动, 历经一年多的时间, 于 2005 年 6 月完稿。

我们为本书的编写与出版付出了艰辛的劳动, 特别是克服了多方面的困难。首先, 一直为出版经费的不足而苦恼, 虽然地震科学联合基金会资助了一部分出版经费, 但与所需额度相差较大, 只好到处“开源节流”, 历经 3 年的努力, 最终勉强解决了出版经费。其次, 始终抽不出集中的时间, 静下心来进行写作, 一方面外孙的出生除了快乐也带来许多

“家务”，占去不少时间，另一方面人虽已退，但事仍不少，多项国家标准与地震行业标准的编写与审议工作、中国数字地震网络工程的监理工作及各种会议等，总是和本书的编写工作时间发生冲突，不得不采用“加班加点”的办法，特别是放弃节假日的休息而集中精力编写，使编写工作断断续续，一直到完稿。再次，是感到力不从心，现代科学的飞速发展科技文献的层出不穷，使我们感到仅有“经验”与“资料”是不够的，需要不断学习，不断扩充知识和开拓眼界，使本已不足的时间显得更加紧张。因此，这是一本“难产”的书。这种局面使本书带有一些缺陷，在系统性与完整性方面尚显欠缺，各部分的内容安排方面有些不平衡，有些问题的论述深度不够等。

由于我们的学识有限，书中部分内容不得不邀请几位同事协助编写。王基华副研究员与林元武副研究员编写了4.2节和12.3节，孙君秀副研究员编写了6.3节，刘五洲博士编写了2.1节与11.3节的部分内容。在编写过程中，还得到了刘耀炜研究员、王道研究员、王广才研究员、孙天林高级工程师、刘春国副研究员、谷元珠高级工程师、朱培耀工程师、杨贤和工程师、杨竹转助理工程师等在资料方面的支持。中国地震局地质研究所图书情报资料室的同志们，在查阅图书资料方面给予了大力协助，甚至星期天也提供了特别的借阅服务。部分书稿的录入打字工作得到了刘成龙助理研究员与阎君伟同志的帮助。因此，本书的完稿与上述同事、朋友与学生们的协助分不开，在此致以衷心的感谢。在本书的出版过程中，得到地震科学联合基金会办公室李明先生与气象出版社郭彩丽女士的热情关心与协助，在此也致以谢意。

为本书的编写与出版，我们费尽了心思，也得到了很多朋友、同事与学生们的协助，但由于我们的水平、能力与精力有限，书中难免存在各种不足乃至错误。对此我们深表歉意，并恳请读者批评指正。

作 者

2005年6月30日

目 录

序	陈运泰 1
前言	3
图表索引	15

第一编 地震地下流体学基础

1 地壳及其流体	3
1.1 地球及其流体	3
1.1.1 宇宙中的地球	3
1.1.2 地球的形成	3
1.1.3 地球内部的圈层	4
1.1.4 地球外部的圈层	6
1.1.5 地球流体	7
1.2 地壳及其基本特征	10
1.2.1 地壳概述	10
1.2.2 地壳的结构	10
1.2.3 地壳中的岩石	11
1.2.4 地壳运动与地质构造	12
1.2.5 地壳中的动力作用	14
1.2.6 地质年代	15
1.3 地壳浅层流体	18
1.3.1 地下水的概念	18
1.3.2 含水层与隔水层	20
1.3.3 地下水的埋藏类型	20
1.3.4 水文地质结构	21
1.3.5 地下热水	22
1.3.6 地下气体	23
1.3.7 氦与汞	24
1.4 地壳深层流体	28
1.4.1 科拉超深钻井揭露出的深部流体	28
1.4.2 KTB科学钻井揭露出的深部流体	32
1.4.3 与深层流体有关的壳内高导低速层	34
1.4.4 与深层流体有关的地质现象	35
1.4.5 地壳深部的超临界流体	37

2 地表表层与地下流体的运动	40
2.1 地表水循环与地壳流体的运动	40
2.1.1 地球表面的水循环	40
2.1.2 地壳浅层流体的运动	42
2.1.3 地壳深层流体的运动	46
2.2 地下流体运动的基本特征	49
2.2.1 含水层中的水流	49
2.2.2 地下水渗流运动的基本规律	52
2.2.3 地下气体的运动	55
3 地下水的物理、化学特性	57
3.1 地下水的物理特性	57
3.1.1 地下水的温度	57
3.1.2 地下水的颜色与透明度	58
3.1.3 地下水的味与嗅	58
3.1.4 地下水的放射性	58
3.1.5 地下水的导电性	59
3.2 地下水的化学组成和特性	60
3.2.1 地下水的化学组成	60
3.2.2 地下水的化学性质	63
3.2.3 地下热水的化学组成与水化学温标	65
3.3 地下流体的同位素特征	68
3.3.1 同位素的概念	68
3.3.2 氢同位素与氧同位素的特征	68
3.3.3 碳同位素的特征	70
3.3.4 其他同位素的特征	70
4 地下水的形成与演化作用	72
4.1 地下水的成因类型及其化学组分特性	72
4.1.1 渗入成因的地下水	72
4.1.2 沉积成因的地下水	73
4.1.3 岩浆成因的地下水	74
4.1.4 变质成因的地下水	74
4.2 水-岩相互作用与地下水化学组分的变化	75
4.2.1 溶解与沉淀作用	75
4.2.2 吸附作用与离子交换作用	83
4.2.3 脱碳酸与脱硫酸作用	86
4.2.4 地下水的混合作用	87
4.3 地下水化学组分变化的热力学和化学动力学	87
4.3.1 热力学和化学动力学的基本概念	87

4.3.2	水溶液的热力学	92
4.3.3	水溶液的化学动力学	99
5	地壳中的应力及流体的影响	101
5.1	地壳岩石中的应力与应变	101
5.1.1	地壳中的作用力	101
5.1.2	岩石中的应力与应变	102
5.1.3	地壳应力场及其研究方法	105
5.2	构造应力场	112
5.2.1	中国大陆的现代构造应力场	112
5.2.2	地壳中深部的现代区域构造应力场	114
5.2.3	地壳浅层的现代应力场	116
5.3	流体影响应力场的数值模拟研究	118
5.3.1	地壳应力场与渗流场的耦合理论	118
5.3.2	流体对地壳应力场影响的数值模拟	122
5.3.3	流体对深部震源应力场的影响	129
5.3.4	流体对浅层前兆应力场的影响	133
6	地壳岩石的变形破坏与流体作用	139
6.1	岩石与岩体的变形破坏及水的作用	139
6.1.1	岩石的变形与破坏	139
6.1.2	岩石与岩体变形破坏中水的作用	144
6.2	流体对岩石变形破坏影响的三轴实验研究	147
6.2.1	实验概况	147
6.2.2	实验结果及其分析	148
6.2.3	结论与讨论	155
6.3	流体对断层滑动影响的实验研究	156
6.3.1	实验概况	156
6.3.2	流体对断层面摩擦系数的影响分析	159
6.3.3	流体对断层滑动方式的影响分析	163
7	流体作用与构造活动	168
7.1	流体作用与全球构造的形成和演化	168
7.1.1	地球内部流体与全球构造的形成	168
7.1.2	地幔流体上涌与大洋洋脊	169
7.1.3	俯冲带、碰撞带与流体作用	171
7.2	流体作用与区域构造的形成	173
7.2.1	流体作用与构造活动的关系	174
7.2.2	构造活动中流体作用的机制	175
7.3	新构造活动中流体作用的研究	175
7.3.1	新构造运动与断裂活动	175

7.3.2 流体对断裂现今活动性的影响 178

第二编 地震地下流体学专论

8 地壳中的流体与地震活动 185

8.1 地壳热流体与地震的平面展布 185

8.1.1 辽东半岛地区温泉的分布与地震活动的关系 185

8.1.2 红河断裂带北段温泉水温度与地震活动的关系 186

8.1.3 华南沿海地区热水活动与地震活动的关系 188

8.1.4 京津唐地区地热异常区与地震活动的关系 188

8.1.5 延怀盆地温泉热水特征与地震活动的关系 190

8.1.6 陕甘宁交界地区温泉热水特征与地震活动的关系 194

8.2 地壳流体活动与震源深度分布 196

8.2.1 延怀盆地中小地震活动的多震层与地下水循环深度的关系 196

8.2.2 中国大陆高导层对强震活动的控制作用 197

8.2.3 华北地区高导低速层与强震活动的关系 199

8.2.4 华北北部地区高导低速层精细结构与地震活动关系研究 202

8.3 震源体的高导低速特性及其与流体活动的关系 205

8.3.1 阪神地震震源体的低速高泊松比特性 205

8.3.2 拉托尔地震震源体的高导低速特性 205

8.3.3 张北地震前后震中及其邻区深部电阻率的变化 206

8.3.4 震源体与流体关系的讨论 208

8.4 流体活动对强震复发周期的影响 208

8.4.1 关于地震活动周期 208

8.4.2 断裂带中的流体活动 209

8.4.3 地震活动周期性的断裂阀模式 211

8.5 流体的诱震与促震作用 213

8.5.1 深井注水引起的地震活动 213

8.5.2 水库蓄水引起的地震活动 215

8.5.3 煤矿开采方式的改变引起的地震活动特征变化 217

8.6 地壳硬夹层孕震与流体促震的假设 220

8.6.1 地壳中存在硬夹层 220

8.6.2 硬夹层是多震层及其条件的数值模拟 222

8.6.3 强震震源体内充满流体 224

8.6.4 流体对岩石强度的弱化作用 224

8.6.5 硬夹层孕震和流体促震假设的要点 226

9 地下流体动态观测台网 228

9.1 地下流体动态观测台网概述 228

9.1.1 地下流体观测台网与台站 228

9.1.2 地下流体观测台网的建设简史 229

9.1.3	地下流体观测台网的布局和组成	230
9.1.4	地下流体观测台网的观测井特征	238
9.1.5	地下流体观测台网的观测项目	239
9.1.6	地下流体观测台网的功能与作用	240
9.1.7	国外的地下流体观测台网	244
9.2	地下流体动态观测技术	249
9.2.1	水位动态观测技术	249
9.2.2	水温动态观测技术	253
9.2.3	测氧技术	254
9.2.4	测汞技术	259
9.2.5	地下流体其他测项的观测技术	261
9.2.6	地下流体新测项及其观测仪器	263
9.3	地下流体动态观测台网的现代化	264
9.3.1	观测技术的数字化改造	264
9.3.2	观测台网技术的现代化	265
9.3.3	观测台网布局的调整与优化	267
9.4	地下流体动态观测井台建设的规范化	273
9.4.1	台址遴选	273
9.4.2	台址的基本要求	276
9.4.3	观测井的建设	278
9.4.4	观测室与其他设施建设	286
9.5	地下流体动态观测台站的环境保护	287
9.5.1	台站观测环境及其保护	287
9.5.2	观测环境干扰指标与允许干扰度	288
9.5.3	确定干扰源与观测井间最小距离的水文地质基础	292
9.5.4	各类干扰源与观测井间最小距离的规定	295
9.5.5	关于台站环境保护中有关规定的使用	297
10	地下流体动态类型与特征	299
10.1	地下流体动态概述	299
10.1.1	地下流体动态的概念	299
10.1.2	地下流体动态观测	299
10.1.3	地下流体动态分类	301
10.2	地下流体的正常动态	302
10.2.1	水位的正常动态	302
10.2.2	水温的正常动态	311
10.2.3	水氧与气氧的正常动态	314
10.2.4	水汞与气汞的正常动态	320
10.3	地下流体的前兆异常动态	323
10.3.1	地下流体前兆异常的概念	323
10.3.2	水位的震兆异常	324
10.3.3	水温的震兆异常	328

10.3.4	水(气)氡的震兆异常	332
10.3.5	水汞的震兆异常	336
10.3.6	其他测项的震兆异常	337
10.4	地下流体的干扰异常动态	340
10.4.1	地下流体的干扰异常概述	340
10.4.2	台站观测环境变化引起的干扰异常	341
10.4.3	其他成因的干扰异常	354
11	地下流体异常与地震预测	361
11.1	地震预测的现状	361
11.1.1	地震预测与预报的概念	361
11.1.2	地震能否预测的争论	362
11.1.3	当前地震预测的能力和水平	365
11.1.4	地下流体学科预测地震的思路	365
11.2	地下流体异常的识别与震兆异常的落实	367
11.2.1	观测数据的类别	367
11.2.2	观测数据的处理方法	368
11.2.3	异常信息的提取方法	375
11.2.4	异常落实与震兆异常信息的提取	378
11.3	地下流体前兆异常的机理	379
11.3.1	地震前兆机理概述	379
11.3.2	地下流体前兆异常信息的生成机理	383
11.3.3	地下流体前兆异常信息的传递机理	388
11.3.4	地下流体前兆异常信息的表现机理	394
11.4	地震预测的方法	396
11.4.1	根据水位异常预测地震的方法	396
11.4.2	根据水氡异常预测地震的方法	401
11.4.3	根据其他测项的异常预测地震的方法	402
11.4.4	地震预测的新方法	403
11.4.5	地震预测的实例	409
12	地下流体动态其他信息的开发与利用	420
12.1	水位微动态信息的开发与利用	420
12.1.1	求算含水层的水文地质参数	420
12.1.2	确定基岩含水层的裂隙特征	423
12.1.3	确定区域应力场状态	424
12.1.4	监测断层的现今活动	428
12.2	地下水对多种地球物理观测信息的影响	431
12.2.1	地下水对重力观测信息的影响	431
12.2.2	地下水对地壳形变观测信息的影响	432
12.2.3	地下水对地电磁观测信息的影响	438
12.3	断层带排气信息与隐伏断裂探测	440

12.3.1 断层带排气及其观测概述	440
12.3.2 已知断层上的断层气探测	442
12.3.3 隐伏断层上的断层气探测	444
12.3.4 影响断层气测值的因素及其分析	447
12.3.5 断层气探测隐伏断裂的技术方法	452
参考文献	454
名词索引	464
后记	496

图表索引

- 图 1.1 地球内部的圈层结构图/4
- 表 1.1 地球内部的圈层结构划分表/5
- 表 1.2 地球内部各圈层的基本特征表/5
- 图 1.2 软流圈及其作用/6
- 表 1.3 清洁干空气在海平面附近的标准成分/6
- 表 1.4 水圈中水的类型及其水量/7
- 表 1.5 地球各层圈中的气体/8
- 表 1.6 不同温度下喷出的气体组分/10
- 表 1.7 常见的造岩矿物及其基本特征/11
- 表 1.8 岩浆岩的分类简表/12
- 表 1.9 沉积岩分类简表/12
- 图 1.3 单斜岩层及其产状/13
- 图 1.4 典型的背斜与向斜构造示意剖面图/13
- 图 1.5 断层的类型示意图(a)正断层;(b)逆断层;(c)平移断层;(d)平移逆断层;(e)平移正断层/14
- 表 1.10 地壳中主要的动力作用/14
- 图 1.6 不同岩层与岩体形成的先后关系示意图/15
- 表 1.11 中国地质年代表/17
- 图 1.7 岩土中的空隙(a)土壤中的孔隙;(b)岩石中的孔隙;(c)岩石中的裂隙;(d)可溶岩中的溶隙与溶洞/19
- 图 1.8 地下水的赋存形式(a)气态水与液态水(毛细水与重力水);(b)吸着水与薄膜水/19
- 图 1.9 地下水的埋藏类型示意图/21
- 图 1.10 基岩地区水文地质结构的基本类型(a)体状结构;(b)层状结构;(c)带状结构/22
- 表 1.12 地壳上层气体的成因分类/23
- 表 1.13 若干岩石中 R_a 的质量分数/25
- 表 1.14 常见岩石的氢射气因子/26
- 表 1.15 炭和硅胶对氢的吸附因子(r)/26
- 表 1.16 不同介质中氢的扩散系数(D)量值/26
- 表 1.17 不同温度下氢的溶解度因子(α)/27
- 表 1.18 不同温度的泉水中水氢与气氢的含量及氢的溶解度因子(α)/27
- 图 1.11 科拉超深钻井区地质剖面示意图/29
- 图 1.12 科拉超深钻井冲洗液中的气体测试结果/30
- 图 1.13 科拉超深钻井的水文地质剖面/32
- 表 1.19 科拉超深钻井水文地质分带表/33
- 表 1.20 KTB 超深钻井深层水的化学特征/34
- 图 1.14 地壳中的高导低速层(a)低速层;(b)高导层/35
- 图 1.15 冀中凹陷区中断裂在地壳深处转平的现象/36
- 图 1.16 深源岩石中的流体活动痕迹(a)山东栖霞橄榄岩中的气孔(放大 100 倍);(b)黑龙江科洛橄榄岩中的孔管(放大 285 倍)/36
- 图 1.17 纯物质的相态图/37
- 表 1.23 一些物质的临界常数/38
- 表 1.24 超临界流体(临界点附近)、气体和液体的几个物理参数/38
- 图 2.1 地球表面的水循环示意图/41
- 图 2.2 松散砂土层中雨水的入渗过程/42
- 图 2.3 几种典型的水动力系统示意图(a)山前洪积扇地区;(b)山前盆地或河谷地区;(c)向斜构造发育的山区;(d)断裂构造发育的山区/43
- 图 2.4 地下水对地下水的补给作用/44
- 图 2.5 地表水和地下水的补给、排泄关系图(a)地表水补给地下水;(b)地下水补给地表水;(c)地表水和地下水互为补给与排泄/45
- 图 2.6 基岩地区常见泉的成因类型(a)侵蚀泉;(b)接触泉;(c)溢出泉;(d)断层泉/45
- 图 2.7 地壳深层流体的运移方式(a)热对流作用下的运移;(b)热传导作用下的运

- 移/47
- 图 2.8 乌鲁木齐山前凹陷带地球物理测量结果及其解释(a)电磁测深结果表明低阻层在地壳深部呈“柱状”分布;(b)对“柱状”的地质解释为沿深大断裂有深部流体上涌/48
- 图 2.9 钻孔水柱高度(h_n)与测压水头(H_n)/50
- 图 2.10 典型的流网图(a)承压含水层中的稳定流;(b)潜水含水层中的稳定流/51
- 图 2.11 层流(a)与紊流(b)运动示意图/51
- 图 2.12 含水层中渗流运动示意图/53
- 图 2.13 含水层中的微小平行六面体及其中的渗流/54
- 表 2.1 气水垂直运动时自由气体超越气水运动的速度/56
- 表 3.1 地下水的温度分类表/57
- 表 3.2 我国部分地区地下热水的温度与水循环深度计算结果/58
- 表 3.3 地下水中铀、镭、钍的含量/59
- 表 3.4 华北地区一些井(泉)水的电导率/59
- 表 3.5 地下水的化学组成/60
- 表 3.6 常量离子的当量数/62
- 表 3.7 河北某矿泉水主要离子的当量浓度及其百分比/62
- 表 3.8 地下水中常量离子的质量数/63
- 表 3.9 河北某矿泉水主要离子的质量摩尔浓度及其百分比/63
- 表 3.10 地下水的矿化度分类/64
- 表 3.11 地下水的酸碱度分类/64
- 表 3.12 地下水的硬度分类/65
- 表 3.13 延怀盆地地下热水与冷水的化学组分对比表/66
- 表 3.14 西藏羊八井热田中不同热水的水化学特性表/66
- 图 3.1 SiO_2 溶解度与温度的关系/67
- 表 3.15 常用的 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Ca}^{2+}$ 水化学温标/67
- 表 3.16 氢与氧同位素及其平均丰度/68
- 图 3.2 大气降水渗入成因的地下水的 $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ 关系/69
- 表 3.17 由氡含量推断地下水年龄的指标/70
- 表 3.18 地球各圈层中三个同位素比值的差异/71
- 图 4.1 柴达木盆地中段地区地下水水化学图/73
- 表 4.1 不同地质时期生成的岩浆岩中的地下水化学特性/74
- 表 4.2 某些矿物在水中的溶解反应式及其平衡常数和溶解度/77
- 表 4.3 一些化合物在温度为 286 K 时的溶度积/78
- 图 4.2 石英在高温体系($t \geq 200^\circ\text{C}$)中的溶解度/79
- 图 4.3 方解石在 H_2O 中的溶解度 t - P 曲线/80
- 图 4.4 二氧化硅溶解度与 pH 值的关系/81
- 表 4.4 地下水环境特征指标/82
- 图 4.5 300 $^\circ\text{C}$ 时不同的 Eh-pH 条件下铁(Fe)的存在形式图/82
- 图 4.6 岩石和矿物超声作用下的封闭氢的释放率和吸附氢生成率/84
- 表 4.5 超声作用下氧增量中吸附氧和封闭氧所占的比例/84
- 表 4.6 不同温度、压力条件下水蒸气的摩尔体积/89
- 表 4.7 不同温度、压力条件下 CO_2 的摩尔体积/89
- 表 4.8 三种石英的热力学数据/96
- 表 4.9 不同温度和压力下 α 石英的溶解度/97
- 表 4.10 25 $^\circ\text{C}$ 的标准状态下的热力学数据/97
- 图 4.7 CO_2 溶解于水的两相平衡关系图/98
- 图 4.8 CO_2 在水溶液中水合反应的速度图/100
- 图 5.1 地壳岩石中微小的平行六面体及其上作用的应力/103
- 图 5.2 压应力(σ_c)、张应力(σ_t)和剪应力(τ)示意图/104
- 表 5.1 常见岩石的变形模量与泊松比/105
- 图 5.3 岩块受力与破裂面的生成示意图/106
- 图 5.4 构造形迹与构造应力场关系图/107
- 图 5.5 唐山大地震前后的 1975—1977 年首都圈地区垂直运动速率图/109
- 图 5.6 我国大陆 1999—2000 年 GPS 观测得到的位移速率图/109
- 图 5.7 由双力偶震源解求震源应力场的方法示意图/110
- 表 5.2 云南通海 M_s 7.6 级地震的震源机制解/110
- 图 5.8 地应力场的物理模拟(a)和数值模拟(b)结果图/111
- 表 5.3 三峡工程区 800 m 深孔应力测量结

- 果/112
- 图 5.9 中国及邻区现代构造应力场图/113
- 图 5.10 中国大陆现代构造应力场分区图/113
- 图 5.11 东部与西部地区最大主应力随深度变化对比图/114
- 图 5.12 康滇地区现代构造应力场分区/115
- 表 5.4 我国垂直应力与上覆岩层自重关系的统计/116
- 图 5.13 地壳浅层应力与深度的关系(a)垂直应力(σ_v)与深度(H)的关系;(b)平均水平应力(σ_{hv})与深度(H)的关系/117
- 图 5.14 地壳浅层水平应力(σ_h)与垂直应力(σ_v)的关系(a)最大水平应力(σ_{hmax})与垂直应力(σ_v)的比值随深度(H)的变化(b)最小水平应力(σ_{hmin})与垂直应力(σ_v)的比值随深度(H)的变化/117
- 图 5.15 唐山地区基岩地质构造略图/123
- 表 5.5 研究区及其邻近地区的地壳各层的速度结构/124
- 表 5.6 华北北部地区地壳及上地幔速度结构/124
- 图 5.16 唐山地区有限单元网格划分示意图(a)第一类网格;(b)第二类网格;(c)第三类网格/126
- 表 5.7 震源应力场计算时段的划分/127
- 表 5.8 浅部前兆场计算时段的划分/127
- 图 5.17 固液相互作用模型计算程序框图/128
- 表 5.9 震源应力场研究模型中各层物理力学参数/129
- 表 5.10 震源应力场研究的地质模型/129
- 表 5.11 震源应力场模型中边界载荷/130
- 图 5.18 干模型和湿模型下研究区最大剪应力差值($\Delta\tau/\text{MPa}$)等值线图(a) T_2 时段(震源体非线性变形阶段);(b) T_3 时段(震源体邻区失稳阶段)/131
- 图 5.19 干模型和湿模型下研究区体应变差值($\times 10^{-7}$)等值线图(a) T_2 时段(震源体非线性变形阶段);(b) T_3 时段(震源体邻区失稳阶段)/132
- 表 5.12 前兆应力场地质模型/133
- 表 5.13 前兆应力场模型的物理力学参数/133
- 图 5.20 t_4 时段两个模型前兆应力场[平均主应力(MPa)]对比图(a)湿模型;(b)干模型/134
- 图 5.21 t_5 时段两个模型前兆应力场[平均主应力(MPa)]对比图(a)湿模型;(b)干模型/135
- 图 5.22 t_5 时段 0~1 km 深度两个模型前兆应力场[平均主应力(MPa)]对比图(a)干模型;(b)湿模型/136
- 图 5.23 t_5 时段 1~3 km 深度两个模型前兆应力场[平均主应力(MPa)]对比图(a)干模型;(b)湿模型/137
- 表 5.14 干、湿模型上 3~6 km 深度破裂单元数量统计/137
- 图 5.24 不同深度和不同时期的干、湿模型上破裂单元数量对比(a)0~1 km 深度模型;(b)1~3 km 深度模型;(c)3~6 km 深度模型/138
- 表 6.1 常见岩石的强度值/140
- 图 6.1 岩石单向受压时的 σ - ϵ 关系曲线/140
- 图 6.2 岩石变形破坏过程的组合类型/141
- 图 6.3 典型的岩石与岩体变形破坏过程的比较/142
- 表 6.2 岩体结构类型及其基本特征/142
- 表 6.3 不同结构岩体的抗压强度参考值/143
- 表 6.4 不同类型的不连续面抗剪强度参考值/144
- 表 6.5 水对黏土质粉砂岩岩体变形模量的影响/145
- 表 6.6 水对各类岩石抗压强度的影响/145
- 图 6.4 干燥(a)和有水充填(b)时两个岩块间接触面的变形和破坏/147
- 表 6.7 试件的岩石类型及其基本特性/148
- 图 6.5 不同温度(T)、围压(P_c)、初始孔隙压力(P_p)条件下岩石三轴高温高压实验的部分结果/149
- 图 6.6 三种岩石试件在不同围压下求得的差应力与应变关系图(a)花岗闪长岩;(b)白色细砂岩;(c)红色细砂岩/150
- 表 6.8 围压对花岗闪长岩强度和破裂方式的影响/151
- 表 6.9 围压对白色砂岩强度和破裂方式的影响/151
- 表 6.10 孔隙压对岩石峰值强度的影响/151
- 图 6.7 三种岩石试件在不同孔隙压下求得的 $\Delta\sigma$ - ϵ 关系曲线图/152
- 图 6.8 两种岩石试件在不同化学组分流体浸