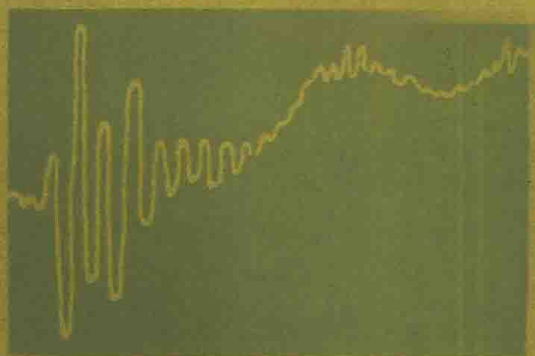
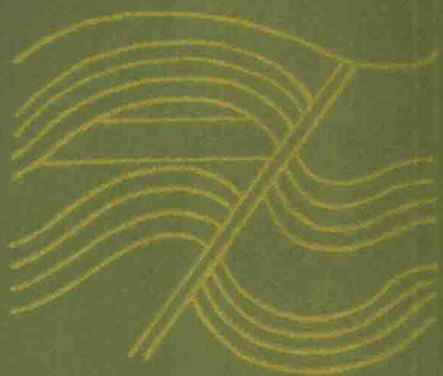




地震流体地质学概论

蔡祖煌 石慧馨 编著



地震出版社

地震流体地质学概论

蔡祖煌 石慧馨 编著

地震出版社

1980

内 容 提 要

本书阐述了一门新的边缘学科——地震流体地质学的研究对象、任务和基本内容。全书共分十二章。首先概括介绍了地壳不同深度流体的赋存特征和运移规律；其次叙述了流体力学、地球化学和放射性地球化学的一般理论和新的测试技术以及地震前兆的识别方法和前兆震例；初步总结了地下流体前兆的时空分布特征，并从地壳固体与流体间力学和物理化学方面的相互作用探讨了地下流体前兆机理和地下流体在地震形成过程中的作用。

本书可供地震工作者、水文地质工作者和地球化学工作者以及其他有关人员参考，并可作为相应学科的辅助教材。

地震流体地质学概论

蔡祖煌 石慧馨 编著

*

地质出版社 出版

北京复兴路63号

中国科学技术情报所印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 13¹/₄印张 320千字

1981年2月第一版 1981年2月第一次印刷

印数0001—3200册

统一书号：13180·92 定价：1.40元

前 言

十几年来，国内外在探索用地下水、石油和气体等流体预报地震和探讨地下水在地震形成中的作用方面积累了不少资料和经验。同时近年来国外流体地质学、地下流体物理化学动力学、流体地球化学、流体放射性地球化学等学科都获得了迅速的发展，其中有不少内容值得我国地震工作者借鉴。因此，我们编写了这本《地震流体地质学概论》，初步总结了国内外地震流体地质学领域的新成就，以促进地震流体地质工作的开展。

地震流体地质学是一门崭新的学科，需要通过反复实践，使其内容不断充实，方法趋于完善，理论逐步提高。因此，本书尚未形成成熟的完整系统，只是当前国内外地震流体地质学大量研究成果的汇集。编写系统、完整的专著尚有待于资料和经验的继续积累。

本书第一、五、六、七诸章和第九章第四、五节由石慧馨编写，其余章节由蔡祖煌编写。

在本书的编写过程中，丁国瑜、许渭铭、许绍燮、汪成民、高名修、张尔匡，以及全国各地有关地震工作者对编写内容提出了不少宝贵意见，这对提高书的质量是有帮助的。书中引用了中国科学院化学研究所和物理研究所，地质科学研究院水文地质工程地质研究所，河北省地质局唐山水文地质站和其他有关省市地震局（队）的一些资料，还参考了国家地震局1973年水氡训练班和1979年水化学进修班的有关讲义。作者谨对上述单位和个人致以谢意。

作者 一九七九年七月于北京

目 录

引 论	(1)
第一章 地壳和上地幔中的流体	(5)
第一节 地壳和上地幔中的气体	(7)
第二节 岩石圈中的水	(10)
第三节 地壳中的石油	(16)
第二章 地下流体物理化学动力学基础	(18)
第一节 地下水动力学中的一些基本概念	(18)
第二节 渗透、扩散和热传导的基本定律	(23)
第三节 水盐热均衡方程或连续性方程	(30)
第四节 物质和热能交换的基本微分方程	(32)
第五节 气体水的运动特点	(38)
第三章 地下流体力学动态	(41)
第一节 动态曲线的分级	(42)
第二节 动态的影响因素	(44)
第三节 动态的成因类型	(49)
第四章 地下流体力学动态在地震预报中的应用	(51)
第一节 动态观测的特殊方法	(51)
第二节 观测数据的处理	(61)
第三节 前兆震例	(70)
第五章 地下水地球化学	(73)
第一节 地下水中的常量元素	(73)
第二节 地下水中的微量元素及超微量元素	(78)
第三节 表征介质地球化学环境的几个主要物理和物理化学指标	(81)
第四节 地下水化学成分形成的控制因素	(83)
第六章 地下气体、石油及油田伴生水和气体地球化学	(87)
第一节 气体组分的地球化学特征	(87)
第二节 气体的生成和运移	(92)
第三节 石油及油田伴生水和气体	(95)
第七章 流体地球化学在地震工作中的应用	(99)
第一节 测试技术及其发展方向	(99)
第二节 前兆震例	(102)
第三节 前兆异常的多样性及规律性	(109)

第四节	在研究区域地震活动性和地震成因方面的应用实例·····	(111)
第五节	地震活动期流体成分异常变化的化学和物理化学过程·····	(114)
第八章	流体放射性地球化学 ·····	(117)
第一节	元素放射性基本概念·····	(117)
第二节	放射性元素的水文地球化学·····	(124)
第九章	流体放射性地球化学在地震工作中的应用 ·····	(130)
第一节	一些测试分析方法·····	(130)
第二节	放射性动态的影响因素和观测数据的处理·····	(133)
第三节	前兆震例·····	(141)
第四节	在研究区域地震活动性方面的应用实例·····	(143)
第五节	地震活动期异常变化的控制因素·····	(145)
第十章	地下流体前兆的时空分布特征及其在地震预报中的应用 ·····	(147)
第一节	前兆的短临显现及其在预报发震时间上的应用·····	(147)
第二节	大地震前兆分布的大区域性及其在预报震级时的应用·····	(148)
第三节	前兆的多区分布及其在预报震中时的应用·····	(150)
第四节	前兆的浅部显现和分布的不均一性及其在选择观测点 和观测项目时的应用·····	(152)
第十一章	地壳固体物理状态的变化对地下流体的影响及其 在地震工作中的应用 ·····	(158)
第一节	地下流体前兆和后效机理的探讨·····	(158)
第二节	通过地下流体记录地震·····	(171)
第三节	通过地震研究地下流体·····	(174)
第十二章	地下流体对地壳固体物理状态的反作用及其在地 震工作中的应用 ·····	(175)
第一节	地下水对岩石的力学作用和物理化学作用·····	(175)
第二节	地下流体在天然地震和诱发地震形成中的作用·····	(184)
第三节	通过地下水控制地震和通过诱发小震预报地震·····	(196)
附 录:	(一) 本书用的物理量符号 ·····	(203)
	(二) 本书用的数学符号 ·····	(203)
主要参考文献	·····	(204)

引 论

为了对地震流体地质学有一个概括的认识,在讲述正文之前,有必要谈谈地震流体地质学的产生背景、发展简史及其研究对象和今后的发展趋势,并论述地震流体地质学各方面任务和内容的统一性。

一、地震流体地质学的产生背景

学科的互相渗透和边缘科学的出现是现代科学发展的重要特征之一。地震学由于近年来吸取了不少相邻学科的研究成果和研究方法,得到了较大的发展,对地震的成因、预报和控制开展了比较广泛的学术讨论,并且逐渐向解决现实问题的方向迈进。

地震流体地质学的产生,最关键的一点是由于地下流体可以具体地反映地下深处岩体物理状态的变化和物质迁移的状况。地壳内固体与流体间存在着力学和物理化学方面的动态平衡,在固体受力、变形、破裂过程中,通过岩石—水—气间的能量传递和物质交换,流体的某些指标会有灵敏的反应。通过流体又能比较迅速地把深部信息传递到浅部来。

同时,在流体渗入固体孔隙的过程中,固体的某些力学性质和物理化学性质会有显著的变化,特别是抗剪强度会明显降低。流体积极参与了地壳的各种运动,特别是在地震的孕育和发生中起着不可忽视的作用。因此,地下流体是地壳运动和地震成因中的一个重要因素,是控制地震,通过诱发小震提高地震预报的准确性,通过对各种前兆手段资料的综合分析提高地震预报水平的一个重要途径。

这样,提高地震预报水平,寻找灵敏前兆以及提高防震抗震能力,探索控震途径的迫切需要,有力地推动了地震学与流体地质学的结合。

另一方面,现代科学技术的发展提供了不少新的研究方法和测试手段,使地震流体地质学的形成成为可能。首先是在地下流体方面出现不少新的测试仪表,如气相色谱仪、离子选择电极和水质连续分析遥测传输装置、质谱仪、能谱仪等。这就使一些微量组分和特殊项目的高灵敏度连续观测成为可能,并积累了宝贵的观测数据。其中同位素的测试研究,更能解决很多构造问题和水文地质问题。随着科学技术的发展,一些超深井(最深达9583.2米)、灵敏井(水位变化一毫米相当于 1.21×10^{-10} 的微量体应变)相继出现,控制地震的实验也在一些国家积极开展。

其次,六十年代至七十年代初,相继出现了物理化学力学和水岩力学这两门新学科。前者研究决定物体力学性质和内部结构的物理化学因素,以便利用这些因素控制固体的力学性质和加工过程;后者把地下水动力学和岩石力学结合成一体,以解决边坡稳定、坝基稳定和渗漏、采矿等问题。这两门新学科虽然不是解决地震问题的,但其基本思想,即物理化学过程与力学过程间的相互作用以及固体力学与流体力学的结合,都给地震研究以很大的启发。看来,岩石力学和物理化学等学科渗入地震流体地质学是最有发展前途的。

所有这些科学技术上的进展,说明建立地震流体地质学的条件正在形成,当前已是提出建立这门学科的任务的时候了。

二、地震流体地质学现代国内外研究简史

现代对地下流体与地震关系的研究,是从水库地震开始的。1937年美国胡佛水库发生5级地震,本世纪四、六十年代开始研究水库地震。1962年新丰江水库发生6.1级地震之后,我国也开始了这方面的研究。六十年代在赞比亚、希腊、印度等国又相继发生5级以上水匠地震七次,水库地震的研究蓬勃开展,对地下水在水库地震中的作用获得了越来越多的认识。

1966年3月,我国邢台地震前,震中区广大群众发现不少地下水前兆异常,宏观现象十分丰富,显示出了利用地下水预报地震的广阔前景。1967年河间地震后,在京津沧邢广大地区内组织了井水位的群测工作。

1966年4月,苏联塔什干地震后,乌洛莫夫(В.И.УЛОМОВ)等查阅震中区疗养院的测氡资料,发现地震前三、四个月热水中溶解氡浓度上升近两倍,震后恢复。1967年几次余震前,类似现象多次重复出现,认为氡是地震预报的一种很有希望的指标,并开展了其他水化学项目的观测。

1968年起,我国除广泛开展地下水位与地震关系的观测外,开始在一些地区观测地下水中溶解氡浓度的变化。1969年在北京小汤山建成了以测溶解氡和逸出氡为主,兼测水电导、水温、水位、流量、气压、气温、相对湿度的地下热水综合观测研究站。此后,陆续在一些地区开始观测地下水中其他溶解气体和离子、pH值等多种化学组分。通过近十年来将近十个7级以上大地震的检验,发现了地下水、气体、石油的一些前兆异常震例,特别是发现了唐山地震的强余震前包气带气体氩氮比值、地下热水中溶解氡等突出的前兆异常,这是这些指标典型震例在国际上的首次发现。还初步总结了我国复杂多样的地质条件下异常的物理现象和化学组分与地质背景的关系,初步研究了地下流体地震前兆的时空分布特征,讨论了地下流体地震前兆的机理。

本世纪七十年代,苏、美、日等国都在一些地震活动带开辟了地下流体动力学和流体地球化学的现场观测和试验性地震预报,不少项目的观测能连续自动记录,有的还能进行遥测传输,如日本静冈县清水市建成了水电导、pH值、水温遥测传输的地震水化学观测站。苏联发现了较多的水位临震异常,并在前兆机理研究方面开展了较多的模拟实验。美国发现圣安德烈斯断层上井水位变化与断层蠕动和附近地震之间有一定关系。日本杉崎隆一在1978年1月伊豆大岛地震前也发现地下气体中氩氮比值变化,氩氩比值也有变化。日本还取得了氡和水温等前兆震例。

近年来,中、美、日、苏等国除了研究利用地下流体进行短临地震预报外,还利用地下流体研究区域地震活动性和地震成因。如美国巴纳斯(I. Barnes)等发现全球二氧化碳流体出露带与地震活动带、变质作用带、地热异常带一致,地震活动带内的许多二氧化碳流体出露点富集了碳的重同位素(1978)。本书作者之一补充分析了我国资料后发现,我国温、热碳酸泉出露在地震活动带内,冷碳酸泉则出露在地震活动性较弱的地区;我国西藏、地中海北部滨海地带和加利福尼亚是世界三大二氧化碳流体集中出露带(1979)。美、苏、冰岛等国的研究表明,活动断裂带上氦、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、氢、氮、甲烷、二氧化碳、硫化氢、汞、氯离子和热流值往往增高。日本胁田宏等发现松代地震后震群区某些点上氦、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 远高于地壳内的数值,认为可能由安山岩浆由地幔上涌和岩石结晶时析出气体所致,而震群亦与流体涌出有关(1978)。美国肖尔茨(C.H. Scholz)、努尔(A. Nur)的扩容—渗透模式(1972—1973)和布雷迪(B.T. Brady)的微裂群区模式(1975),苏联阿夫昌(Г.М. Авчян)的封闭震源开

启模式(1976)等均考虑了水在地震形成中的作用,用水的活动解释各种前兆现象。我国也有人研究了邢台地震和唐山地震孕育和发生中的地下水因素(1977—1978)。

在研究水库地震和水在天然地震形成中作用的基础上,在发现美国丹佛深井注水诱发地震以后,雷莱(C.B. Raleigh)等在蓝吉利油田进行注水—抽水控制地震的试验,已得初步成果(1976)。日本也在松代地区开展控制地震的试验研究。

最后,在利用地下水记录地震方面,我国发现了水位记录地震波和固体潮极为灵敏的北京洼里深孔(水位变化一毫米相当于体应变 1.21×10^{-10} 的井孔)积累了十一年以上的连续观测资料,并进行了初步分析。比利时详细研究了海巴特深孔水位记录地震波和固体潮的情况(1971),但该孔记录地震波和固体潮的灵敏度远逊于北京洼里孔。

综上所述,本世纪六十年代以来,地震流体地质学的研究事实上已经在国内外逐步开展起来,这一学科的形成也就成了必然的趋势。

三、地震流体地质学的研究对象和发展趋势

地震流体地质学是研究地下流体与地震关系的一门新学科,它把物理、化学、力学同流体地质学结合起来用于地震科学研究领域,研究地震活动期内各种地球物理场和形变场与地下流体运移场之间的相互作用及其在不同地质条件下的表现,以便有效地通过地下流体预报、诱发、控制、利用和记录地震,研究区域地震活动性和地震成因,并通过地震研究地下流体。

关于地震流体地质学的今后发展趋势,可大致设想如下:在岩石力学、地下流体动力学、流体地球化学、物理化学等理论上研究岩土与水、气间力学和物理化学方面的相互作用,在充分考虑地质条件的基础上结合可靠震例,开展系统的模拟实验,深入研究前兆机理和地下水在地震形成中的作用,提高地震预报水平,探索通过地下水控制地震的途径。

在这个总的发展趋势下,最好能开展下列四方面的工作:

1. 捕捉突变性发震信号,突破临震预报。
2. 通过注水诱发小震了解发震应力差,可能提高预报的准确性。
3. 深入研究地下流体对其他前兆手段的影响,可能提高综合预报水平。
4. 通过地下水控制地震,分段或分期化大震为小震,化地震为快速蠕动,并通过高速地下水、气流把蠕动时产生的热能携带出来,进行综合利用。

四、地震流体地质学各方面任务和内容的统一性

为了学会接收和解读地下流体这种“地球内部向我们拍发的电报”(日本学者正冈寿久弥语),本书重点阐述地下流体的地震前兆信息在自然界是如何变化的,又是如何才能被我们认识并用来为地震研究服务的。

地下流体的地震前兆信息在自然界具有四个变化过程:

1. 前兆信息的形成:在地震孕育过程中,发生了产生地下流体前兆信息的地壳固体物理状态的变化,如岩石受力、变形、破裂、超声振动、温度和电磁场的变化等。地壳固体物理状态的变化和地下流体前兆信息以及随后发生的地震,都是附加构造应力剧烈活动的产物。这属于孕震物理研究的范围。

2. 前兆信息的转化:地壳固体物理状态的变化引起地下流体的一系列变化,应力活动转化为地下流体前兆异常。这属于前兆物理研究的范围。

3. 前兆信息的传递: 前兆信息形成和转化的地区, 不一定是前兆手段的观测区, 因此就有一个前兆信息向观测区传递的过程, 这个过程是通过地下流体异常运移实现的。这也属于前兆物理研究的范围。

4. 前兆信息的表现: 地下流体的各种前兆信息传递到观测区后, 并不能在区内所有观测点上全部表现出来, 每种前兆信息只能在一些观测点上表现出来。为接收到这些前兆信息, 结合地区条件正确选择观测点和观测项目非常重要。

人们认识和利用地下流体的地震前兆信息也要经历四个阶段:

1. 前兆信息的观测。

2. 前兆信息的识别: 为识别和确认前兆, 必须对观测数据进行科学的分析。

3. 前兆信息的研究: 确认前兆以后, 就要对大量可靠的前兆震例进行系统的研究, 不但要研究其时空分布特征, 而且要研究前兆异常的物理现象和化学组分与地质背景的关系, 还要研究前兆的机理, 追溯前兆信息在地下介质中的变化过程。

4. 前兆信息的利用: 在时空两方面, 都要利用找到的规律根据现在的事实推断未来的事实。空间方面, 利用从国内外震例中总结出来的预报方法与自然条件联系的规律以及规律性强弱的程度, 根据当地自然条件推断适用于当地的预报方法(包括异常项目和前兆特征), 并估计这种推断的可靠程度。时间方面, 利用从过去的震例中总结出来的地震三要素与前兆特征联系的规律以及规律性强弱的程度, 根据现在观测识别出的前兆特征预报未来可能发生的地震的三要素, 并估计这种预报的可靠程度。

由上述可见, 地震成因、前兆机理、前兆特征和预报方法的研究必须紧密结合起来, 不可分割。

地下流体在地震形成中的作用不但为地震预报开辟了崭新的前景(注水诱发小震), 而且为通过地下流体预报地震提供了坚实的基础, 因为既然地下流体参与了地震的形成, 那就必然会有临震前兆。因此, 单从提高地震预报水平的需要来看, 地震成因、预报、控制和记录的研究也必须紧密结合起来, 不可分割。

从人类与地震的关系来看, 地震预报还只是人类改造地震的开始。人类还要控制地震, 利用地壳应变能。而从地下流体与地震的多种联系来看, 地下流体与地震既有同源关系, 可作为地震前兆和预报地震的手段; 又有因果关系, 可作为地震成因中的一个要素和控制地震、利用地壳应变能的手段; 还有另一种因果关系, 可作为地震后效和记录地震的手段。反过来, 地震可作为地下流体天然扫描和研究地下流体的手段。地震流体地质学, 特别是其理论核心岩土水气物理化学力学(地壳固体与地下流体在力学和物理化学方面的相互作用), 把通过地下流体预报、控制、利用、记录地震和通过地震研究地下流体结合成一个统一的整体。

下面我们就按流体地质学、地下流体物理化学动力学、流体地球化学, 流体放射性地球化学的顺序, 依次叙述其基本内容及其在地震工作中的应用。最后三章初步总结了地下流体前兆的时空分布特征, 论述了岩土水气间力学和物理化学方面的相互作用, 在此基础上探讨了地下流体前兆机理和地下流体在地震形成中的作用。

第一章 地壳和上地幔中的流体

地球大体是一个具有圈层状结构的椭球体，由地壳、地幔和地核构成。三大圈层约各占地球体积的0.5%，83.3%和16.2%，而这三大圈层还可再分为七层（图1）。其中地壳和上地幔顶部合称岩石圈或岩石层，其下在上地幔中部有软流圈或软流层，而在地壳表层一些地方有松软层，也有人把松软层视为岩石层的一部分。

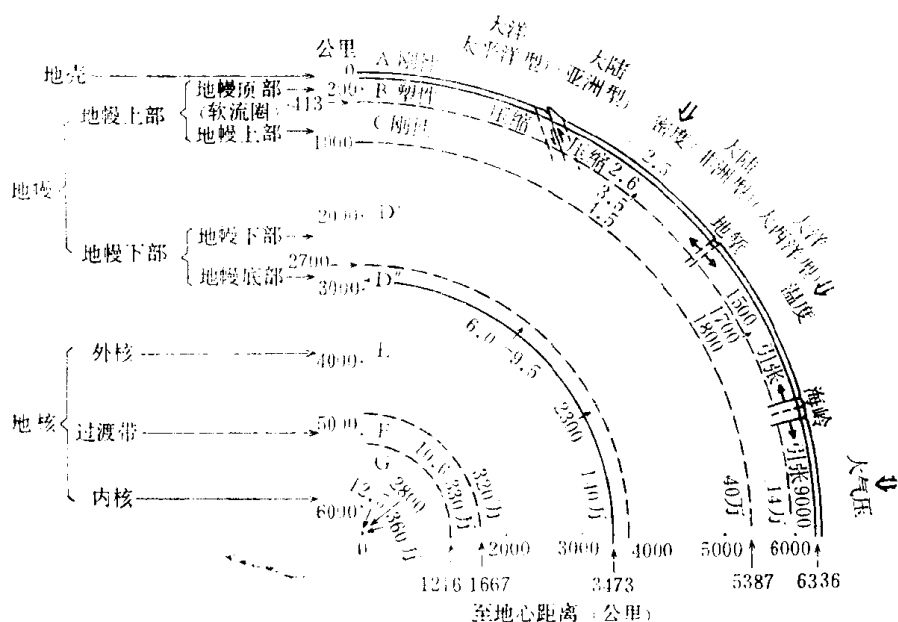


图1 地球分层结构

〔据佩特罗舍夫斯基（Б. А. Петрошевский）加以补充〕

虽然当前钻探尚未到达地壳中、下部和上地幔这一深度，但是，根据火山、地热、岩浆岩中流体包裹体以及高温高压实验研究等，已能初步掌握深部地下流体的赋存特征（表1）。

地壳5公里以上深度的流体，在水文地质学、石油天然气地质学方面已作了比较详细的研究，积累了大量的实际资料。在5—10公里深度的个别地点上也有些勘探资料。更深部主要是一些推测性较大的间接研究成果。

浅源地震主要发生在岩石圈中，深源地震则可在上地幔下部发生。地震科学工作者非常重视深部震源区的流体活动信息，但是，限于当前的技术水平，我们只能在浅部取得信息，而其中某些信息可能来自深部。浅部流体异常活动的信息也不容忽视，因为发动构造地震的地应力是一种体力，它作用在从深部到表层的整个深度内，深部和浅部流体在地震前附加应力作用下的表现特征各有不同，经过仔细研究，将会提供各自的信息，使人们根据反应灵敏的流体异常掌握地震的孕育、演变及发生的规律，在多学科配合下，逐步提高预报和预防地震的水平。因此，在为地震服务的流体地质学研究中，应当充分利用相邻学科已取得的地下流体的有关成就。本章将根据现代观念扼要叙述地壳和上地幔中流体的赋存特征。

第一节 地壳和上地幔中的气体

地壳和上地幔顶部的流体主要分布在岩石的孔隙、裂隙以及孔洞中。在地壳的最表层（除海洋、湖泊下及沼泽洼地外）岩石孔隙、裂隙、孔洞中充满了气体，称为包气带。包气带以下岩石空隙主要被水溶液所填充，称为饱水带。包气带中也有各种形式的水分，主要是在分子力作用下移动的结合水和既可在表面张力作用下移动，又可在重力作用下移动的毛细水，以及能在重力作用下自由移动的重力水透镜体。在饱水带中，也有溶解于水中的气体及封闭于透镜体中的自由气藏。它们与大气圈和岩石圈的固相物质以及地壳深部高于临界温度（液态水不能继续存在的温度）的特殊状态的流体之间，不仅在地质历史上完成一系列的转化，而且在构造活动加剧时，由于各相间动态平衡的破坏，常有短时间完成的异常运移。

一、地壳上部的气体

地壳为大气所包围，地壳上部的气体与大气圈中的空气不断交替，空气的密度随着高度的增加而减小，它的质量的一半集中在高度5公里以内，10公里以上空气已极为稀薄。大气成分在地球的不同演变阶段中是不同的。从500—600万年开始直到现在，形成了一层厚数十公里的、成分比较稳定的空气。现代接近地表的干燥空气成分列于表2。

表2 现代接近地表的干燥空气成分（体积百分比）

N ₂	78.084	He	0.00052	O ₃	10 ⁻⁵ —10 ⁻⁶
O ₂	20.946	Kr	0.00011	CO	10 ⁻⁵ —10 ⁻⁶
Ar	0.934	Ne	0.0000087	N ₂ O	10 ⁻⁶
CO ₂	0.033	H ₂	10 ⁻⁵	NO ₂ , NO	10 ⁻⁶ —10 ⁻⁸
Ne	0.00182	CH ₄	10 ⁻⁵ —10 ⁻⁶	重烃	10 ⁻⁷

大约60公里以上的大气层强烈电离，形成电子浓度往上递增的D、E、F等区，在高空成分也逐渐分异。对地壳上部影响较大的是近地表的空气。

地壳上部的气体有吸附在岩石、矿物表面的吸附气，在岩层间相互连通的孔隙中自由运移的自由气。合适的构造中封存大量的自由气时可形成气藏。在成岩过程中封存于岩石、矿物晶体中的气体为气体包裹体（表3）。

地球最上部包气带中以自由气为主，其成分主要为大气成因的氮、氧、氩、二氧化碳，但空气进入地下后，其成分发生变化，其中的氧因消耗于生物化学作用而逐渐减少。相反，二氧化碳却增高，还可产生少量的生物成因的硫化氢、甲烷、重碳氢气和气体氮氧化合物。生物成因的氢气和一氧化碳很不稳定，产生后即被微生物氧化。

进入地下的空气呈自由气状态或溶解于水中带往深处，在流体交替积极带形成以氧化过程为主的含氧、二氧化碳、氮、氩（有次生镭分散存在时，还有氡、钍射气）等的地下气体，该类型含气带的深度可由零到几米直至一公里左右。

再往下，流体交替滞缓，温度和压力也逐渐增大，在还原性增强的地球化学条件下，氧含量锐减，硫化氢作为指示剂出现，氮仍以大气成因为主，生物化学成因的二氧化碳和甲烷成为主要组分，也最稳定。

表3 浅部地下水、气的赋存介质、存在状态、驱动力和运移形式

介 质			地 下 水		地 下 气	
岩性和赋存空间	力学性质	变形形式	存在状态	驱动力和运移形式	存在状态	驱动力和运移形式
松散砂石大孔隙	松 散 体	塑性形变	自重力水	重力和压差下流动 压力变化时溶解和沉淀 浓度差下扩散	自由气 溶解气	压力差下渗透 压力差，浓度差下扩散
坚硬岩石宽裂隙	不连续、不均一弹性体	粘滑蠕动	毛细水	毛细力悬挂在水面上， 毛细带随水面升降；毛细力作用下由较大孔隙流入较小孔隙		
松散砂石小孔隙	松 散 体	塑性形变	水	不动水	保留气	压力等物理、化学条件的改变，引起自由气、溶解气、吸附气、晶格联结气之间动态平衡的破坏和各种状态下存在的气体的转化（溶解和逸出，吸附和解吸，晶格联结气参加扩散）
坚硬岩石细裂隙	不连续、不均一弹性体	弹性形变—塑性流动—脆性破裂		高压下压出 压差大时越流		
软弱岩土大孔隙	粘塑性体	塑性形变	结合水	高压下压出，振动和离子交换时部分转化为自由水；表面张力作用下由水膜较厚处流向水膜较薄处	吸附气	
软弱岩土小孔隙			吸着水	随湿度（水的蒸气压）变化而增减		
坚硬岩石晶格	不连续、不均一弹性体	弹性形变	结晶水	高温高压下蛇纹石、石膏等脱水，热液作用下一些岩石水化	晶格联结气	

此带的气体主要是由生物化学作用, 即有机质和含硫矿物的分解生成的。由于各地地温梯度、热动力条件不同, 此带的深度从500—600米到5—6公里不等。生物化学作用一般是在低温到中温下进行的, 随着深度加大, 温度不断增高, 直至形成高温带, 变质成因的气体逐渐增多, 变质作用终于取代生物化学作用而成为深部气体形成的主要过程。

沉积盖层的厚度各地不一, 在结晶基底出露地区没有沉积盖层, 洋底的沉积盖层仅厚0.5—1公里左右, 而沉积凹陷地区盖层厚度可达10—15公里以上。5—10公里的深处还有少量直接钻探资料(主要在沉积岩中)。如我国在7公里深处发现天然气藏, 气体压力达1548大气压。国外在5—6公里深处发现气藏压力达1300大气压, 温度274℃, 主要含有甲烷、重碳氢气、氮、二氧化碳, 有时伴有硫化氢、氦、氡、氢等。

在结晶基底中, 也有在5公里深的钻孔中取得的气样。如苏联在鞑靼穹隆5公里深的钻孔中采取的气样, 其成分是(据佐里金(Л. М. Зорькин) 1977): 碳氢气以甲烷为主(11—16%), 并含有其他多种重碳氢气, 含氮68—69%, 氢1.5—8%, 氦1.12%, 氩5—7%, 二氧化碳小于3%, 氩的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=1390$, 而空气的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=295.5$, 说明除大气氩外, 尚有放射性氩, 氦氩比值很高($\text{He}/\text{Ar}=5.2$)。

再向深部, 温度、压力继续增大, 热催化变质作用增强, 有机质和碳氢物质碳化, 析出甲烷和氢气。深度12—15公里(此值是按平均地热梯度推算的, 实际上在具体的部位可以是几公里或几十公里, 如图2所示)处, 温度接近于浓卤水的临界值(400—425℃), 压力高达数千至数万大气压。这时, 气水溶液过渡到超临界流体, 氢键断开, 分子处于自由状态, 二氧化碳和水同样成为深部重要流体, 具有很大的溶解能力, 密度接近于固体。气水溶液参加区域变质作用下的岩矿再造过程。由于各种物质的分解和水与岩石的化学反应, 形成很多

‘气态、挥发性元素和化合物。上地幔的一些易挥发组分往往通过地壳断裂或以火山、‘气孔、‘喷泉等等形式随熔岩或气水溶液逸出。

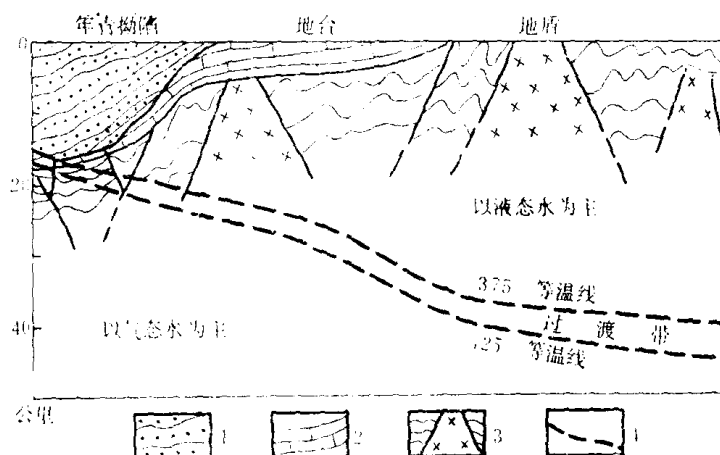


图2 液态水过渡为气态水的深度示意图〔据马卡连科(Ф. А. Макаренко)等〕

1 —— 中、新生界压密较弱的砂-粘土质和钙质岩石；
2 —— 以古生界为主的致密砂岩、粘土页岩、石灰岩和其他成岩的沉积岩；3 —— 古生界和更古老的结晶片岩、石英岩、片麻岩、岩浆岩；4 —— 断裂线

二、地壳下部和上地幔中的气体

地壳深部以及上地幔的气体特征，根据近期岩浆活动区的地热异常显示、火山活动、岩浆包裹气以及室内在岩浆岩加高热时对析出气的实验研究，得知其成分主要为二氧化碳、氢、氮、硫化氢、氦、氩、二氧化硫、氟、氯的氢化物等。如我国著名的有新生代火山活动、近代尚有地热异常显示的云南腾冲的一些逸气中，二氧化碳含量达85%，硫化氢10—30%，有时还检出二氧化硫、一氧化碳，而硼、砷、氟化氢、氯化氢等挥发组分涌出地表前常已溶解于地下水中。

高温火山气孔气体成分一般是以二氧化碳为主，有时有含量较高的一氧化碳、氢气、氯化氢，而日本一些高温火山气孔中二氧化碳含量较低，氯化氢、硫化氢、二氧化硫和二氧化硅含量较高。

岩浆岩孔隙中，常含有与外界隔绝的保留气。在真空条件下通过粉碎岩石可以析出，也可将岩样加高热至相当于地壳深部的温度使之释放出来。研究这种气体的成分，可帮助我们了解地壳深部气体成分的特征。一般，一公斤岩矿样品可析出500—600立方厘米气体。近代这方面的研究成果表明：玄武岩-辉绿岩中以二氧化碳为主，含量大于50%，还会有氮、甲烷和氢。发现在300—850℃生成的伟晶岩包裹气中，氮可占60%。此外，还有二氧化碳、氢和甲烷，但未见重碳氢气。花岗岩中含氮也达50%以上，其余为氢、二氧化碳、甲烷。在低温(80—85℃左右)下长时间加热抽取真空破碎岩样的孔隙吸附气，曾测得碱性岩浆岩中有较高的甲烷含量(有时高达80%)和少量的重碳氢气，此外还有氢、氮和少量的氧。

南非等地垂直向深部延伸数公里的筒状金伯利岩喷出气可能与岩石圈下部和上地幔有直接联系。例如某区金伯利岩气体成分是：氢——50%，甲烷——35.5%，氮——6.5%，重碳氢——2.5%，氩——0.16%，氦——0.03%。

火山析出气中的很多组分，如水蒸汽、二氧化碳、氢、二氧化硫、硫化氢、氯化氢等，一般认为来源于上地幔，但在向地表运移过程中，随着深度、压力的变化，各相之间的平衡改变，组分间的比例也发生变化。当然，这些气体在高温高压条件下的物理状态与出露地表的也不相同。

气体沿垂直方向可简化归纳为三个地球化学带（表1）：

1. 表层生物化学带：除大气来源的气体外，主要生气过程是生物化学作用。

2. 化学热催化作用带：大约在地壳1—2公里深处，化学热催化作用与生物化学作用在生气过程中均起相当作用，而进一步加大深度时，生物化学作用减弱，以至消失，化学热催化作用成为主要生气过程，是化学热催化作用带。

3. 深部热催化作用带：该带处于地壳下部和上地幔顶部，温度、压力均很大。在岩石与水相互作用下，各种物质分解，形成各种简单化合物。很多元素均呈气态，有向温度低、压力小、浓度低的地壳上部扩散的趋势。

除了受热动力条件控制的上述气体垂直分带外，还有一些放射性成因的气体，如氦、氡、氢等，它们的分布取决于岩性和构造封闭性等。

气体分布在整个岩石圈中。沉积盖层中的流体（包括水、气、油）占总体积的20%，其中气体约有 2×10^{18} 立方米。地壳中的气体约有 3×10^{19} 立方米，地幔中的气体约有 4×10^{21} 立方米。地壳和地幔中含的气体均远远大于大气层中的气体数量（ 5×10^{15} 立方米）。气体的形成和运移受地壳温度和压力的控制。反过来，对地壳温度、压力的平衡也起积极调节作用。数公里到数十公里以下的流体呈过热气水溶液状态，蒸气压达数千或数万大气压。它们在中浅源地震和火山过程中的作用是不可忽视的，它们给出的前兆信息，往往可在事件发生以前到达地表。

第二节 岩石圈中的水

岩石圈中的水呈固、液、气三态存在。固态水（即冰）仅在高寒地区和多年冻土区常年存在。地壳中温度从水的冰点（ 0°C ）到水的临界温度（ 375°C ）间均有液态水存在，岩石圈中80%的水为液态水，其厚度平均可达12公里（实际在岛弧地区仅为2—3公里；在火山地热活动区，在不太深处即达临界温度，而发生汽化；在地壳稳定地区可达25公里或更大）。这种液态水，尤其是5公里以上的液态水层，用现代勘探技术已进行了广泛的研究。

一、水在自然界的循环

地壳上部的流体，通过包气带与大气层、地表水进行不同程度的交替（年和多年循环），深部流体也以扩散、渗透、破裂上涌等多种形式向上运动。在地质历史上，剧烈的构造运动使地壳隆起和下沉，引起水的埋藏和出露条件发生变迁，加上水在沉积、变质作用、岩浆活动等地质过程中也要改变，因此，水在自然界的循环是十分复杂的。主要以太阳的热能和水的自重为动力，完成大气圈、地表水圈、地下水圈（上部）水的自然循环。

地球表面面积约为 5.10×10^8 平方公里。其中陆地面积为 1.49×10^8 平方公里，占29.2%，海洋面积为 3.61×10^8 平方公里，占70.8%。大气圈中估计含有 1.4×10^{20} 立方厘米的水，其中每年约有2.4%的体积在适当的条件下以各种形式的降水回到地面。然后降水又在地表径流和地下径流的过程中，从地面和水面蒸发返回大气。参加这一循环的水量仅占地球所有水

量的极小部分(0.03—0.04%)，但对人类的影响却很大。

大气降水的成分与距海远近和气候有关。在潮湿气候带多为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Mg-Ca}$ 型，干旱地带 SO_4 含量增高，海边虽然矿化度不高，但水型可为 Cl-Na 型。

河、湖、海洋中的地表水，除以蒸发、降水形式参加循环外，也可通过地表水体底部渗入地下，补给地下水参加循环。地表水中以海洋为主，水量约有 1.37×10^{24} 立方厘米，远大于大气圈中的水量。按其含盐量可分为淡水(小于1克/升)、咸水(1—10克/升)、盐水(10—50克/升)、卤水(50—200克/升)、浓卤水(大于200克/升)等多种，以咸水、卤水为主。

由于自然地理条件、气候、地质结构和岩性的不同，河湖水的含盐量差异也很大，可为淡水、咸水直至卤水。但是河水一般为淡水。

每年由地表水体蒸发和流失的水量，可通过降雨和地下水的补给来补偿，使水量接近平衡。

地壳最上部的水由于距大气圈最近，因此与大气降水和蒸发作用关系密切。

在地震活动期，在孕震过程中和发震前后，常可见到自然界正常水循环失去平衡，形成气象异常，如干旱、热异常等。

二、岩石圈中水的存在状态、成因和赋存介质

(一) 岩石圈中水的存在状态

岩石圈中、上部岩石中的孔隙和裂隙主要为普通液态水所填充，深部还有一些呈特殊状态存在的水。

岩石的孔隙度决定岩石的含水量，岩石空隙的特性取决于它的矿物成分及其经受的地质作用。沉积岩中的孔隙由颗粒之间的孔隙，胶结物内部的孔隙，可溶性岩石中的溶洞以及构造压碎岩块之间的孔隙构成。岩浆岩固结过程中晶体内部形成气孔、气泡，在晶体间形成小孔隙。由于压力下降时气体的逸出，也可形成小泡和空隙。相变时岩石发生形变，可产生无数裂隙。致密岩石中构造作用形成的脆性破裂带也有很高的孔隙性。

干燥情况下的孔隙体积与岩石体积之比为孔隙度。沉积岩平均孔隙度可达0.20—0.30，而变质岩、岩浆岩为0.10—0.01或小于0.01。孔隙的形状和大小，对赋存于孔隙中的流体的运动特征起控制作用。

大洞穴及裂隙、孔隙内的流体在自重作用下移动，能传导静水压力。这种水称为重力水。毛细孔隙内的流体有时在重力作用下，有时在毛细力作用下移动，能传导静水压力，可以压入岩体内使之拉伸、压缩。这种水称为毛细水。这两种水均为自由水。

在更小的孔隙内则只有被分子力所束缚的薄膜水层，这种水不受重力作用的控制，不传导静水压力，可由薄膜厚处向薄膜薄处流动，在高压下可压出。在振动和离子交换过程中，部分转化为自由水，或置换出溶解在这种水中的某些阳离子。在水不饱和的包气带中最接近颗粒表面的有吸着水层，受分子力作用而不受重力作用，不传导静水压力，仅随着岩石湿度变化可与气态水相互转化。薄膜水及吸着水为物理结合水。

此外还有化学结合水，包括沸石水、结晶水和结构水。沸石水与矿物结合得不很紧密，在80—100℃温度下即可逸出，逸出量决定于空气的湿度；结晶水与矿物结合得较紧密，在不到400℃时即可逸出；结构水在高温下才可逸出。上述水、气赋存状态可归纳为表3。

(二) 岩石圈中水的成因