

地壳中的流体

地球物理学和构造地质学问题

[俄罗斯] И.Г.基辛 著

张 炜 佔巴扎布 译

张肇诚 校

地震出版社

地壳中的流体

地球物理学和构造地质学问题

[俄罗斯] И. Г. 基辛 著

张 炜 佔巴扎布 译

张肇诚 校

地 震 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

地壳中的流体：地球物理学和构造地质学问题/（俄罗斯）基辛著；张炜，佔巴扎布译；张肇诚校. —北京：地震出版社，2014. 5

ISBN 978-7-5028-4422-6

I. ①地… II. ①基… ②张… ③佔… ④张… III. ①地球物理学—构造地质学 IV. ①P3
中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 079041 号

地震版 XM3144

И. Г. КИССИН

ФЛЮИДЫ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕКТНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

© Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 2009

© Киссин И. Г., 2009

© Редакционно-издательское оформление. Издательство “Наука”, 2009

著作权合同登记 图字：01-2013-1534 号

地壳中的流体：地球物理学和构造地质学问题

[俄罗斯] И. Г. 基辛 著

张 炜 佔巴扎布 译

张肇诚 校

责任编辑：王 伟

责任校对：孔景宽

出版发行：地震出版社

北京民族学院南路9号

发行部：68423031 68467993

门市部：68467991

总编室：68462709 68423029

专业图书事业部：68721991

E-mail: 68721991@sina.com

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：九洲财鑫印刷有限公司

版（印）次：2014年5月第一版 2014年5月第一次印刷

开本：787×1092 1/16

字数：435千字

印张：17

印数：0001~1000

书号：ISBN 978-7-5028-4422-6/P (5112)

定价：60.00元

版权所有 翻印必究

（图书出现印装问题，本社负责调换）

内 容 提 要

著者总结了多年来地壳流体参与地球物理和构造地质过程和这些过程对流体动态的影响的研究成果,讨论了广泛的问题,包括:流体在形成地壳的地震波和电性不均一性中的作用、流体系统在大陆固结地壳中的分布和典型特点、流体流和地球动力学过程的相互作用、地质介质变形对流体动态的影响等。对流体参与地震震源发展过程,流体对地壳变形特别是地震成因变形的反应给予了特别注意。在此基础上,给出了地壳地震活跃层变质成因模式的论证,讨论了它们相对于波导层和导电层的位置,总结了水文地球动力学地震前兆研究的成果和经验。

本书共分七章,包含三部分基本内容。第一部分(第一、二、三章)介绍了地壳中深部流体(流体系统)的新资料,以及它们与地壳地球物理不均一性(波导层和导电层)的关系。第二部分(第四章)阐述了流体与地球动力学过程的相互作用。第三部分(第五、六、七章)把流体视作地壳内发展中的形变的指示器加以研究,并研究了地下水对地震孕育的反映(水文地球动力学前兆)、探讨了地震前兆和震后效应及其形成机理等一系列问题。

本书较深入地研究了地下流体与地球物理和构造地质过程的关系,探讨了它们在地震孕育过程中的作用,其科学思路、认识和一些新的成果与科学资料对地震流体学科的探索具有重要的参考价值,对相关的地震学科也会有很好的参考作用。

本书可供地球物理学、大地构造学、地质学、水文地质学和地震预测探索,特别是流体预测地震领域的专家研究和参考,并可供相关学科的专家学者参考。

体例说明

本书——《地壳中的流体：地球物理学和构造地质学问题》的中文版，排版体例在保持原著（俄文版）风格的原则上，按中文科技图书的习惯与规定做了部分变动。要点说明如下：

1. 章节编码

原著只分章，章以下不编号。为便于读者查阅，本书章节采取三级编码（见目录，正文中用黑体字）。当不分级仅表示次序时使用①、②、③、…和 a、b、c、…编码。

2. 图、表、公式编号

按原著编号，即：图和表按在书中出现的先后顺序编号；公式按在各章中出现的先后顺序编号。

3. 计量单位的标示

计量单位通常按中文科技图书的习惯与规定用英文符号和中文标示，与中文规定不一致者用相应的英文符号或中文标示，见下表。

书中使用的主要计量单位符号和名称简表

类别	符号	名称	类别	符号	名称
质量	g	克	体积浓度	ppm	百万分之几
	T	吨	氢浓度	Bq/L	贝克/升
长度	m	米	渗透率	D	达西
	cm	厘米		mD	毫达西
	μm	微米	黏度	P	泊
	km	公里，千米		cP	厘泊
面积	m^2	平方米	热量	W	瓦特
体积 (容量)	cm^3	立方厘米		mW	毫瓦
	L	升		Cal	卡，卡路里
	mL	毫升	频率	Hz	赫兹
时间	a	年	电阻	Ω	欧姆
	h	小时	电导	S	西门子
	min	分		mS	毫西门子
	s	秒	地磁	T	特（斯拉）
压力 (压强)	MPa	兆帕		nT	纳特
	Pa	帕	重力 (加速度)	mGal	毫伽
	kbar	千巴			

4. 图例与符号

除计量单位符号按上述进行标示外，文中及图上的图例与符号原则上保持原著中的样式（俄文或英文字缩写）或直接用中文，见下表。

书中使用的主要图例与符号简表

图例/符号	名称	图例/符号	名称	图例/符号	名称
A	幅度	$P_{\text{гидр}}$	水静压力	ρ	电阻率
H	水位	$P_{\text{л}}$	岩石静压力	$\rho_{\text{к}}$	视电阻率
H, h, Z	深度	$P_{\text{ист}}$	实际压力	t, T	温度 (°C)
L, R	长度, 距离, 震中距	$P_{\text{прив}}$	换算压力	Q	流量, 热量
N	次数 (频次)	$P_{\text{н}}$	垂直压力	q	热流值
Σn	频次总和	$P_{\text{н}}$	饱和压力	$Q_{\text{а}}$	品质因数
P	压力或应力强度的统称	$P_{\text{а}}$	大气气压	$Q_{\text{с}}$	平均品质因数
$P_{\text{эф}}$	有效压力	T	时间	f	频率
$P_{\text{ф}}$	流体压力	K	地震能级		

5. 俄文地名的译法

除公开出版的地图或词典中有译名者外，一律按《俄汉译音表》（著译审校手册，科学出版社，1978年）译音。

6. 人名的译法

为方便读者在文献目录中查找相应的文献：除公开出版的书中已有熟悉或习惯的译法外，俄文文献的俄文人名一律按《俄汉译音表》（著译审校手册，科学出版社，1978年）译音，在括号中注以俄文名；英文文献作者的俄文名直接用英文给出。

7. 词的译法

一个词（包括专业词汇）往往可有几种译法；不同词又可以有相同的译法；而在具体的专业表述中又常会有较确定的译法。翻译中，根据词语搭配和专业内容及用语习惯，力求准确，并在全书中统一。如：渗滤、渗透、渗入等；盆地、凹陷、拗陷等；均一性、均匀性等；特征、特点、性质等。又：“плюм (мантийный плюм, mantle plume)”一词在专业词典中找不到合适的译法，俄文和英文文献里没有准确的定义，中文文献中有“地幔柱”、“地幔热柱”、“地幔羽”、“地幔涌流”、“地幔柱状熔岩流”等各种译法，经与著者讨论，确定在本书中将之译为“地幔流体和熔岩流”。

8. 重点的标示

原书中著者用斜体字标示重点结论，本书中用粗楷体字加下横线标示。原书中著者用加下横线标示不编号的重点标题，本书中用粗宋体字加下横线标示。书中少量词语的加粗，是译者为了醒目而加。

译者的话

本书——《地壳中的流体：地球物理学和构造地质学问题》的俄文版，于2009年在俄罗斯由《科学》出版社出版。著者基辛（I. G. Kissin）是俄罗斯科学院大地物理研究所著名的地震水文地质学家，国际知名学者。自20世纪60年代开始他就从事水文地质学与地震学相结合的研究，是地震水文地质学新研究方向的提出者和首创者之一。著者对地壳流体特别是地壳深部流体进行了深入的研究，探讨了流体参与地壳不均一介质变形和地球物理场的变化、流体与地球动力学过程的相互作用、流体对地震振动的反应、深部流体在地壳电性和波速不均一性形成和震源孕育及发展过程中的作用、以及地震前兆的特征和机理等问题，研制了水文地质动力学地震前兆的观测与研究方法。发表学术论文230余篇和7部专著。他的《地震和地下水》（1982年）一书被译成中文已于1986年在我国出版（单修政译，张炜校，地震出版社）。20世纪80~90年代著者基辛与我国地震地下流体领域的专家进行了多年广泛的学术交流与合作，并两次来华进行合作研究和讲学。

地震预报探索涉及多学科领域的知识和科学问题。著者以多年水文地质学的研究与地震监测实践为基础，以严谨的学术作风和科学态度，宽视野地汲取多学科，特别是岩石学、矿物学、地球物理学和构造地质学的知识及新成果，审视和讨论了地壳流体参与地球物理和构造运动过程的问题，本书是他多年研究的总结性著作。书的内容和实际资料丰富，以全球观测资料为背景，较全面、翔实地介绍了现独联体国家（原苏联）地震流体学科的进展和研究成果与观测资料，系统阐述了大陆固结地壳地下流体系统的分布和特点、流体与地球物理学和构造地质学相互关系等广泛的问题，具有很强的知识性。著者对流体对地球变形特别是地震成因变形的反应给予了特别关注。在此基础上，提出了地壳地震活跃层变质成因模式的论证，讨论了它们相对于波导层和导电层的位置，总结了水文地球动力学地震前兆研究的经验和利用流体前兆探索地震预报的可行性等一系列重要问题，特别是关于地震前兆的许多问题，其中包括一些一时难于解答的难题。著者集数十年的知识积累和思考，试图对这些问题加以解答和总结，因而具有很强的探索性，对一些一时难于解答的难题的看法甚至具有挑战性。这一探索风格对科学研究非常可贵，读者可以质疑、不同意、甚至反对某些观点，但可以从中得到启发，并用自己积累的知识和资料展开进一步的研究。译者在翻译过程中注意了准确译出著者对问题的观点、思路和语言表述方式（因为一些表述会有明确、婉转、含蓄等差异），以供读者了解。

笔者曾与基辛教授合作，对他的治学态度、学术作风深为钦佩。《地壳中的流体：地球物理学和构造地质学问题》一书是他多年从事地下流体地震预报探索的总结。他在全书中贯彻了探求物理本质、细致求证、实事求是讨论分析和判定、提出结论与存在的问题等科学的积极探索的学术作风。书中的科学思路、认识和一些新的成果与科学资料对地震流体学科的探索具有重要的参考价值，对相关的地震学科也有很好的参考作用。

鉴于上面所述，笔者于2010年收到著者寄来的赠书后，认为有责任 and 必要将之译成中

文介绍给我国的流体学科的同人和有关学科的研究者，这也是他本人想与中国同行交流的愿望和委托。此书的知识面广、专业性很强，能承担这一翻译工作的专家都年事已高或有其它原因，经一年多的努力未能组织起翻译班子。最后承蒙佔巴扎布和张肇诚的参加，开始了本书的翻译工作，由佔巴扎布翻译一、二、三、四章，张炜翻译五、六、七章和引言与结论等，张肇诚进行了全书译稿的统一校核和编辑，共历时两年完成。

本书是在中国地震局监测预报司、地震出版社和地震流体学科同人的大力支持和鼓励下，在各方面的共同努力下完成的。中国地震局监测预报司李克、车时、马宏生给予了大力支持；俄罗斯科学院大地物理研究所和著者本人在版权授权和翻译过程中都提供了积极的协助；流体学科组刘耀炜研究员，从计划到实施给予了全面的支持；地震出版社张宏、董青和责任编辑王伟，从为本书办理中文译本在中国出版和销售的版权授权手续到译文的编辑出版做了大量工作；在关于固体潮引潮力作用效应的翻译中得到了牛安福研究员的具体帮助。在此一并向他们表示诚挚的感谢，向佔巴扎布和张肇诚表示感谢。本书涉及的专业范围很广，译文中难免会有不妥之处，欢迎读者指正。

张 炜

2013 年 10 月 29 日

目 录

内容提要	I
体例说明	III
译者的话	V
引言	1
第一章 地壳流体的现代概念	3
一、进入地壳的流体的来源、水的水文和地质循环	4
二、地壳深部带中的流体	10
第二章 固结地壳的地球物理不均一性及其与流体的关系	13
一、地球物理不均一性的多样性及其流体属性	13
1. 低速层或波导层	13
2. 导电层	16
3. 下部地壳的地震波分层性	18
4. 地震波高吸收带	19
二、固结地壳中地球物理不均一性的局限分布和对流体来源的不同认识	19
三、参与地球物理不均一性形成过程的流体的成因	25
1. 流体的向下迁移	26
2. 流体来自地幔	29
3. 固结地壳岩层中流体的生成	31
四、小结	33
第三章 固结地壳的流体系统	35
一、固结地壳的流体动力学特点和流体系统的结构	35
二、固结地壳流体系统与沉积层地下水的相互作用	42
1. 古老地台	42
2. 年轻地台和边缘拗陷	42
三、地球的脱气作用与固结地壳流体系统	45
四、流体系统的时空变化	49
五、固结地壳的流体系统和地球物理不均一性是自组织结构	54
六、固结地壳流体系统的主要类型及其与构造岩浆条件的联系	57

七、小结	61
第四章 流体与地球动力学过程之间的相互作用	63
一、水的力学和物理化学作用对地球物质坚固性的影响	63
二、关于流体参与大尺度的构造过程	67
三、流体流与构造变形相互作用时的自组织过程	70
四、激发(诱发)地震是流体参与地震断裂形成的表现	75
五、地壳地震活跃层的变质成因模式	79
六、地壳地震活跃带与流体系统和地球物理不均一性之间的相互关系	83
七、小结	97
第五章 流体是地质介质变形的指示器	99
一、水文地球物理监测	99
1. 水文地球物理学监测的方法原理	99
2. 水文地球物理学监测的应用范围	101
二、地震的水文地球动力学效应	106
1. 地震的前兆效应	106
2. 同震效应	107
3. 震后效应	109
4. 地震对矿物质水、石油和天然气矿产动态的影响	111
三、地壳现今运动的水文地球动力学效应	117
1. 蠕动效应	117
2. 形变波效应	120
3. 非特定的现今地壳运动效应	129
四、非构造成因的水文地球动力学效应	132
1. 固体潮引潮力的作用效应	132
2. 火山活动效应	136
3. 气压效应	138
4. 人为成因效应	138
五、地下水位的锯齿状波动	141
六、可控震源作用于饱和介质的研究	146
1. 振动作用于含水层	146
2. 振动作用于油气层	150
3. 振动作用的流体动力学效应	153
4. 振动效应的机理	155
5. 振动效应的实践意义	157
七、地球动力学过程的地球化学指标	159
1. 地震水文地球化学效应的基本研究方向	159

2. 气体地球化学效应	163
3. 地球动力学过程的地球化学效应的形成条件	164
八、小结	167
第六章 地震水文地球动力学前兆的研究	168
一、研究历史	168
二、方法前提	169
1. 水文地球动力学前兆的类型	169
2. 观测对象的选择和布局	170
3. 观测资料的处理	171
三、地震水文地球动力学前兆观测的一些成果	173
1. 北高加索	173
2. 土库曼科佩特山及其附近地带	175
3. 中国	187
4. 日本	194
四、地震水文地球动力学前兆的基本特征	196
五、小结	205
第七章 地震前兆和震后效应形成的一些问题	206
一、流体系统的应变灵敏度和振动灵敏度	206
1. 应变灵敏度	206
2. 振动灵敏度	213
二、地壳“敏感带”和大幅度地震前兆是块体间相互作用动力学的表现	214
1. 与地震相关的大幅度和远距离效应及其在地壳不同“敏感带”的显现	215
2. 地壳“敏感带”的结构和块体间地带的变形	224
三、介质不均一性、应力-应变场和非线性过程对地震前兆和震后效应的影响	227
1. 地震的源-兆系统	227
2. 应力-应变场结构和介质的不均一性	229
四、关于地震前兆的可靠性	231
五、小结	237
结论	239
一、流体在地壳深部带的分布与大陆固结地壳的流体系统	239
二、流体与地球动力学过程的相互作用	240
三、流体对地球动力学过程的反应	241
四、关于地震前兆	242
文献目录	244

引 言

本书讨论地壳流体参与地球物理和构造地质过程的一些问题。在地壳演化中,流体,首先是水,它的作用是巨大的和多种多样的。水的地质活动性的各种问题几乎在关于地球科学的所有学科里都有所研究。但是对水的问题的关注在不同的时期显示出这样和那样的不同方向,而在地球物理学和构造地质学方面仅在不久前的 20 世纪后 25 年才引起注意。几十年前对于流体参与地壳的构成和地壳中发生的地球动力学过程,没有给予实质性的关注。在地球物理学(Магницкий, 1965)和构造物理学(Гзовский, 1975)奠基性著作中,水的问题没有讨论,没有任何关于流体作用的引文。

含有流体的双相地质介质,按其自身的物理特性(强度特性、密度、导电性和其它)和单相固体介质有明显的差异。在组成地壳的地质材料中,水的存在对其特性有明显的影响。因此,只有在考虑到流体的作用时,地壳结构的许多特性及其内部进行的过程才可以得到满意的解释。在目前的初始阶段,以地球物理学和构造地质学为目的的流体的研究还只能是应用水文地质学和岩石学的经验。地壳的地球物理测深成果也具有重要意义,在此基础上曾划分出电性和地震波的不均一性,其本质与流体有关。比起 20~30 年前,所有这些资料能更确定地判断地壳深部流体的分布和形成条件。

在 W. Fyfe、N. Price 和 A. Thompson 的书中(Fyfe et al., 1978)给出了有关地壳流体形成与特征,以及流体参与某些地质过程的一般性信息,但完全没有从水文地质学和地球物理学研究成果中取得的任何资料。在多卷的“水文地质学基础”专著中,在水的地质活动性这一卷里讨论了水参与了一系列的外生和内生过程(Основы гидрогеологии, ..., 1982)。书中仅给出了有关在变形形成过程中,特别是地震成因的变形中水的可能作用的片段信息。20 世纪后几十年,由于深钻和超深钻探的成果以及地球物理资料的解释所积累的有关地壳深部流体的新资料,促进了流体在地球动力学中作用的研究。岩石学的进展也起到了不可忽视的作用。产生了需要了解地震震源形成过程中流体作用的问题,并在最近提出了需要阐明流体是如何影响地壳不同层位岩石变形的问题。除此之外,开始认识到地下水动态可以作为深部形变过程很好的指示器。其中许多问题,在 2003 年 11 月召开的全俄罗斯“深部流体和地球动力学”学术会上进行了讨论(Флоиды и геодинамика, 2006)。

著者对上述问题的关注产生于 20 世纪 60 年代末期,在进行深部水文地质学研究的过程中对上述问题给予了注意。此前,已了解到在许多地区地下水在数千米深处已处于超水静压力,甚至是岩石静压力的作用下(Киссин, 1967₂)。在这种条件下,水在岩石变形中的作用急剧增大。在此阶段开始的触发地震或诱发地震的强化研究,证明流体首先是水是地震发展过程的重要因素。地下水非常奇妙地反应应力-应变状态的变化,特别是地震的孕育和地震的发生。在此基础上曾建议利用观测地下水动态、水位或水压作为方法之一探索地震的前兆。曾经研究了在地震过程中与地下水作用有关的一系列问题:水参与地震震源的形成,特别是列宾杰尔效应对震源岩石强度的影响;利用水文地质学方法预报地震;在塔吉克斯坦实

验场进行初期研究的建议方案等 (Киссин, 1971)。

以 О. Ю. 施密特命名的大地物理研究所从 1979 年就开展了流体参与地球动力学过程的研究。最初, 这些研究主要涉及地震水文地球动力学前兆研究方法的探索。为此完成了一系列工作: 研制精密的测量设备、建立观察方法和资料处理方法、在实验场进行观测。此后, 扩展了研究领域: 研究了自然和人为的各种地球动力学过程的水文地质效应。对流体, 即地下水和油气矿床对地震振动的反应给予了很大关注。由 20 世纪 90 年代中期, 开展了深部流体对形成地壳电性和地震波不均一性及地震震源发展影响的研究。大部分研究成果发表于一系列国内和国际出版的杂志和论文集中。最近 30 年获得的这些成果为本书的写作奠定了基础。

尽管上述研究是在地球物理学首先是地震学任务中进行的, 但是最终获得的资料对阐明有流体参与的一些构造地质过程的机理是有意义的。从现实论的原则出发, 对现代地壳变形的观测可以给出认识古代变形的钥匙。

本书的内容可以划分为三个主要部分。第一部分, 包括第一、二、三章, 概括地介绍了地壳深部流体 (流体系统) 的新资料及其与地球物理不均一性——波导层和导电带的联系。第二部分 (第四章) 阐述了流体与地球动力学过程的相互作用。第三部分 (第五、六、七章) 把流体视作为地壳内发展中的形变的指示器加以研究。同时, 对地下水对地震孕育的反映 (水文地球动力学前兆)、它们以及一些其它的前兆和震后效应的形成条件给予了特别的关注。当然, 涉及到流体在地球动力学过程中作用问题的许多重要方面, 不包括在本书中。这一问题的涉及面很宽, 要想在解决此问题上取得实质性进展, 只有在多种相邻学科共同取得进展的基础上才能实现。

本书中给出的大部分工作和成果均为著者和同事们共同完成的, 同时还有原苏联一些加盟共和国的研究所和地质机构的同事们参与了工作。著者谨向在不同阶段中, 积极地参与本项工作的 В. Л. 巴拉巴诺夫 (В. Л. Барабанов)、В. М. 别利科夫 (В. М. Беликов)、А. О. 格里涅夫斯基 (А. О. Гриневский)、А. М. 古缅 (А. М. Гумен)、Г. А. 伊尚库利耶夫 (Г. А. Ишанкулиев) О. Н. 克鲁特基娜娅 (О. Н. Круткиная)、Э. Э. 奥罗尔巴耶夫 (Э. Э. Оролбаев) 和 Л. Д. 普鲁茨卡娅 (Л. Д. Пруцкая) 表示感谢。在工作的不同阶段以及著书过程中, 著者曾多次向多位研究者咨询或讨论这样或那样的问题, 他们是: Ю. Н. 阿夫休克 (Ю. Н. Авсюк)、В. В. 阿杜什金 (В. В. Адушкин)、М. Н. 别尔季切夫斯基 (М. Н. Бердичевский)、Л. Л. 瓦尼扬 (Л. Л. Ваньян)、Г. И. 沃伊托夫 (Г. И. Войтов)、А. Г. 甘布尔采夫 (А. Г. Гамбурцев)、А. А. 马拉库舍夫 (А. А. Маракушев)、А. В. 尼科拉耶夫 (А. В. Николаев)、В. Н. 尼科拉耶夫斯基 (В. Н. Николаевский)、Б. Г. 波利亚克 (Б. Г. Поляк)、Ю. Л. 列别茨基 (Ю. Л. Ребецкий)、Д. В. 伦德克维斯特 (Д. В. Рундквист)、В. Л. 鲁西诺夫 (В. Л. Русинов)、Г. А. 索波列夫 (Г. А. Соболев)、С. Ф. 季马绍夫 (С. Ф. Тимашов) 和 В. Ю. 特拉斯金 (В. Ю. Траскин) 等。对本书的工作, В. Т. 列夫申科 (В. Т. Левшенко) 和 А. Г. 格里戈梁 (А. Г. Григорян) 给予了始终不渝的协助。对他们, 著者致以极大的谢意。著者衷心感激本书责任编辑 Ю. Г. 列奥诺夫 (Ю. Г. Леонов) 对本书的关注、工作支持和有益的建议和意见。

第一章 地壳流体的现代概念

对于地下流体的系统研究始于 19 世纪后半叶,是在水文地质学框架内进行的,当时它已经成为了一个独立学科。如果说,最初的水文地质学研究仅限于把地下水作为一种矿产资源,其目的是解决供水和浴疗问题,那么到 20 世纪中叶,这些研究的范围已极大地扩展了。特别是地下水不仅在外生过程中,也在许多内生过程中,例如包括金属矿床和油气田的形成过程中,都被看作是重要因素。水文地质学的实际资料仍主要来源于钻探结果。随着钻井深度的加大,这些资料逐渐丰富起来。“流体”这一概念在水文地质学中没有得到明显的推广,因为水文地质学只从事地下水(水溶液)的研究。

岩石学中流体是被作为矿物形成过程中的最重要因素来进行研究的。岩石学的物理-化学现代基础是由 Д. С. 科尔任斯基 (Д. С. Коржинский) 及其学派所奠定。国内外岩石学家们的工作结果表明,岩浆作用、变质作用和交代作用都是在流体的最为积极的参与下进行的。在岩石学中把流体理解为,这是一种气态或液态物质,与岩石或矽质岩浆的区别在于,流体只有较低的密度(小于 1.5g/cm^3) 和较低的黏度(小于 10P)。流体主要由热液相组成,含有二氧化碳和其它气态组分(Перчук, 2000)。Ф. А. 列特尼科夫(Летников, 2000)认为,流体是深部脱气作用的产物,它们含于岩石圈的岩体中,主要呈水质、水气质、蒸汽质或气质介质。

在解释地球物理学和构造地质学问题时,可把流体看作是一种液态或气液态物质,与岩石圈矿物质的区别在于它们的低密度、低黏度和高移动性。在地壳的不同部位,流体相及其特征变化很大。在浅层,它们是含有相当数量的溶解盐和气的水。在下地壳高温高压条件下,所含的是超临界状态的流体,其成分复杂,溶解物的浓度很高,就其特性这种流体已接近于熔岩。

关于地壳流体的现代概念应以水文地质学、岩石学和地球物理学的研究成果为基础。关于地壳上部层位地下水的性质、分布及水交换条件的大量资料可通过水文地质学研究来获得。然而,实地水文地质资料的获取受限于钻孔深度。对于达到 3~5km 的深度来说,这些资料还可能相当详细;而对于达到 8~10km 深的超深钻区的充水带来说,这些资料就带有片段性了。

想要了解流体在地壳中部和下部的形成和迁移条件,就得考虑深部条件下流体动态的特点,而这已是岩石学的研究对象了。通过这些研究,可以了解流体-矿物平衡的状态以及在矿物形成过程中被封存的古流体的情况。这些流体对于岩石的物理性质以及对于发生于地壳中的各种物理过程并无多大影响。然而,岩石学研究为揭示现今或不久前完成的流体生成或被吸收的过程(首先是变质过程)提供线索,当然还要考虑现今的温度压力条件。

中部和下部地壳中的流体,就其化学成分和物理性质(超临界溶液),明显区别于在地壳上部层位循环的水。在高温高压参数下的流体迁移过程有别于在较低温度压力带中的迁移过程。这些过程主要取决于下列作用的影响,即:矿物的再造作用(主要为变质反应)、岩

浆源的作用（溶于岩浆中之流体的迁移，以及物质熔化和结晶时流体的迁移）和构造变形作用。深部条件下流体的迁移主要靠粒间渗透。水化的离子与水一起沿着颗粒间隙移动的速度要比沿着矿物格架和熔岩中移动的速度高3~5个数量级（Флюидный режим..., 1977）。

对于钻孔无法达到的深度，用地球物理方法可区分出地壳的地震波和电性的不均一性。这种不均一性与流体的存在有关，由此可以判断地壳中部和下部流体系统的分布情况。地球物理不均一性的所在位置和特点可作为固结地壳中流体分布的指示器。这些不均一性反映在岩石的电阻率、地震波的传播速度和吸收等参数上。通常把这些不均一性的本质与在地壳中存在饱和流体的地段和带相联系。通过对地壳进行电性和地震波研究，可以了解这些不均一性的分布和随时间的变化情况，从而可对深部流体的现代动态获得一定的信息。

一、进入地壳的流体的来源、水的水文和地质循环

在地壳中含有各种流体，它们的成分和成因各不相同。流体的成分以水为主，并含有各种溶解物质。随着深度的加大，流体中的碳酸成分逐渐增多，而到了地壳下部层位，碳酸就成为流体的主要组成部分。

在地下水的成因分类中，得到确认的是四大类型，即：渗滤水、沉积水、再生水和岩浆水。渗滤水是靠大气降水和河流、湖泊水进入岩石层而形成。有时把这种水也叫作气象水。这种类型的水广泛分布在地壳的上部层位，而这些层位中水的交换作用很强烈。在稍深一些的层位，水的交换作用较弱，则这些层位中可能含有古代的渗滤水。

沉积水主要是在海洋盆地中沉积物形成过程中保存在岩石中的水，或沉积物进一步固结时释放出来的水。沉积水的演变与海洋沉积物的成岩作用密切相关，在此沉积物转变成岩石。在成岩作用过程中，起变化的不仅仅是沉积物的矿物成分，与沉积物相互作用着的水的化学成分也发生变化。在地壳上部层位所含地下水的主要部分是渗滤水和沉积成因的水。

再生水是在含水矿物的脱水过程中生成的。在此过程中，化学结合水转化为自由状态的水。析出再生水的过程发生在地壳的各种热动力带中。在不太高的温度压力下，石膏和黏土矿物就能发生脱水作用。在高温高压条件下发生的是变质脱水作用和脱碳酸作用，其结果是释放出变质成因的流体。分布在地壳深部的大部分流体具有这种成因。

岩浆成因的水是在岩浆的结晶化过程中形成的。这种水的原始来源是进入岩浆源中的具有深部成因的挥发性物质，或者是在岩浆移动过程中溶解在岩浆中的各种成因的水。被还原的流体的氧化作用是水和二氧化碳的生成来源。

地壳中的流体交换是地球中流体（水）总循环的组成部分。水的总循环可分为相互联系的两个部分——水文循环和地质循环（图1）。对水的水文循环研究得较充分，它的主要分支是：水的蒸发、水蒸汽在大气中的移动、大气降水、地表径流和地下径流。在地壳上部层位中，地下水（地下径流）从地势高处向地势低处的流动是靠水头差来实现的。地势高处的地下水得到大气降水的补给，而在地势低处则分布着各种排水中心——蓄水盆地或泉。取决于地质构造和水文地质结构，这种循环占据了地壳的上部层位，深度经常可以达到2~4km。随着深度的加大，地下水的渗滤速度总体来说是降低的，尽管渗滤速度反向变化情况也不少见。

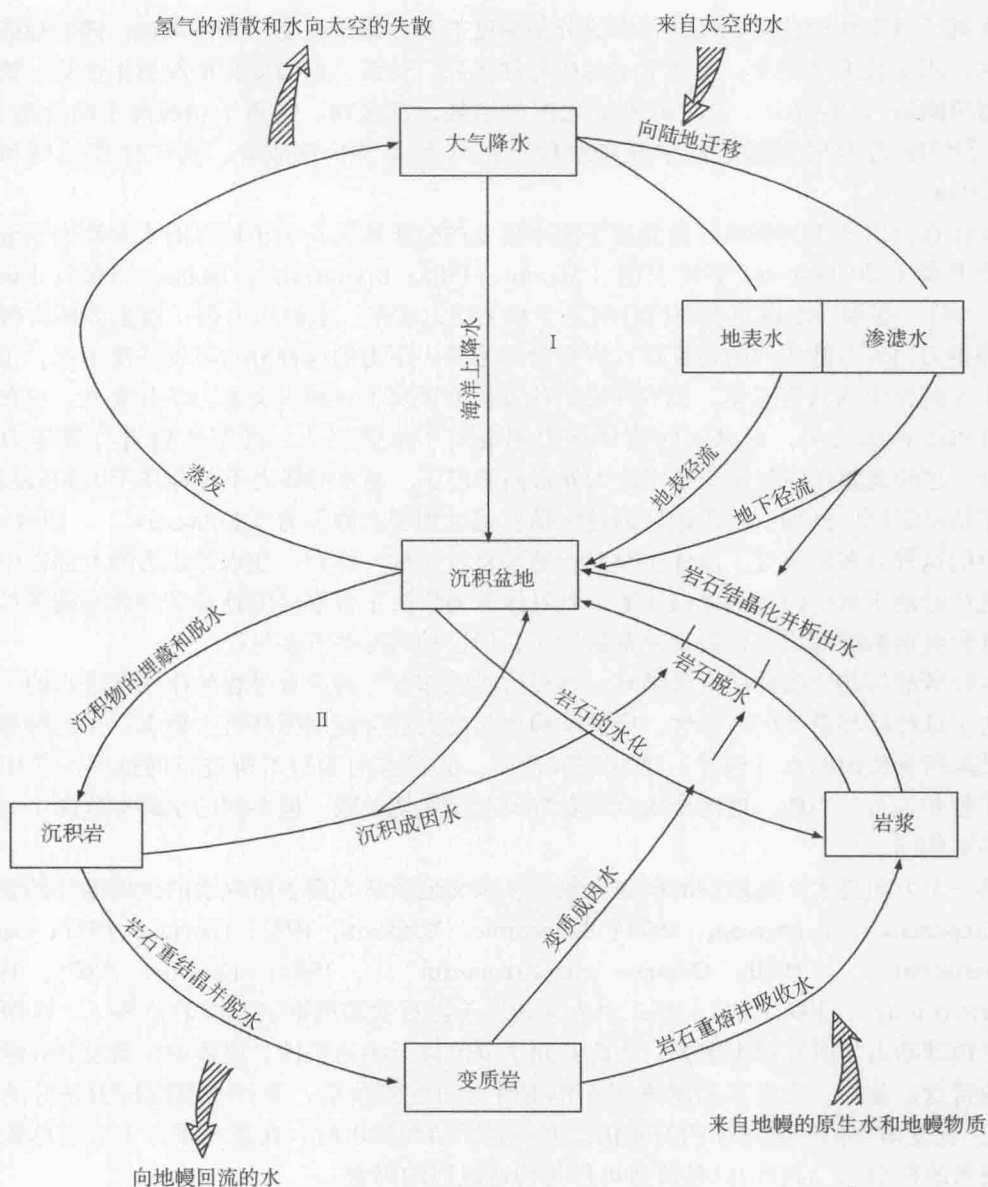


图1 地球中水的水文循环 (I) 与地质循环 (II) 之间的相互关系
(Общая гидрогеология ..., 1980)

在地下径流分布范围内, 根据水交换速度的不同可分为三个带。上带为水交换强烈的高孔隙度和 (或) 高裂隙度的岩层, 这里地下水渗滤速度较高。中带的水交换较慢, 岩石的渗滤性较低, 因而渗滤速度明显降低。下带的水交换相当困难, 岩石的渗滤性很差, 地下水的移动速度极为缓慢, 只有用地质时代来衡量才能觉察到。

地下水的化学特性对于解决某些与流体有关的地球物理问题 (地震前兆、地壳的导电率等) 具有相当重要的意义。不同地区的地下水都有自身的水文地球化学分带性。垂直分

带性表现为地下水的总矿化度和化学成分随深度的加大逐渐变化。总体来说,随着地壳深度的加大,水交换速度降低,而地下水的矿化度提高。然而,反向变化情况也不少见。淡水主要含有重碳酸-钙的成分,而且随着矿化度的增强,氯化物、钠离子和钾离子的含量提高。在沉积物和结晶基底深部层位中分布的地下水具有氯-钠-钙成分,其矿化度达到和超过100~200g/L。

流体在自由相中的移动方向受控于流体压力的分布情况。关于地壳的水文动力学分带性的概念形成于20世纪60年代中期(Мухин, 1965; Кропоткин, Валяев, 1965; Киссин, 1967₁; 等)。在地下水圈范围内可分出三个水文动力学带:水静压力带;超水静压力带,即从水静压力向岩石静压力的过度带;岩石静压力带。压力的这种分布不仅适用于水,也适用于分布在地壳中的其它流体。很多深层钻孔资料都证实了这种水文动力学分带性。这些钻孔钻到含水层和油气层,记录到的流体压力明显高于水静压力,甚至达到岩石静压力水平(图2)。这种现象在油气地质学中称为异常高的层压。超水静压力不仅存在于沉积岩层,也分布在结晶岩层。例如,科拉地区的超深钻就记录到超水静压力(Кольская..., 1984)。流体压力的这种分布就决定了流体主要向上的垂直迁移性。然而,在水静压力的上部带中,还广泛进行着地下水的向下和侧向渗滤,其具体方向取决于含水层的补给条件和卸载条件。在某些沉积盆地的深部层位曾发现异常低层压,但这种情况并不多见。

水和碳酸等其它流体的地质循环,是在这些流体参与的所有过程的作用下进行的。因此就决定了这种循环条件的多样性。应该从两个角度去看待地质循环这个概念:①这种循环过程的结果所释放出的水(流体)的状态和性质;②在水的参与下所进行的过程的作用下生成的矿物和岩石。当然,这两个角度或者方向互相密切关联,但不同的学科对这两个方向的兴趣各不相同。

第一个方向是水文地质学的研究对象。从水文地质学方面去研究水的地质循环的著作很多(Гавриленко, Дерпгольц, 1971; Валуко́нис, Ходьков, 1973; Павлов, 1977; Основы гидрогеологии..., 1980; Основы гидрогеологии..., 1982; Киссин, 1967₁, 1985₁; Коваленко и др., 2002; 等)。第二个方向就属于岩石学和理论岩石学的范畴了。这两个方向对于地球动力学研究都很重要。为此必须了解流体析出的条件、流体的性质及其在地壳中分布的特点。此外,当岩石和流体相互作用时岩石受到改造,并伴有温度压力条件的变化(例如:在变质作用中矿物体积的变化;沉积岩固结和脱水时,在高压条件下岩石体积的变化以及水的析出)。岩石的这种改造可作为构造成因的因素。

参与地壳深部进行的地球动力学过程的流体,其成因主要与水的地质循环有关。各种结构中水的地质循环的特点和强度反映在流体静压力带下界位置上。在这个界限以下,流体在地球动力学过程发展中的作用明显增强。

在地质循环中水(和其它流体)的运动是确定的作用过程的结果,如变质作用、岩浆作用、构造作用,以及岩石的压固和重结晶作用等。所有这些过程都伴有岩石物理性质(密度、导电率、地震波速等)的变化。水的地质循环所发育的范围不仅包括整个地壳,还包括地球更深的部位。在地壳上部层位,地质作用对水的运动的影响规模有限,主要是在沉积物的沉积和石化条件下进行。在深部高温高压条件下,这些过程成为水迁移的决定性因素。迁移经常伴随有水从自由水变化为物理和化学结合水状态,或者发生反向的状态变化。