

# 流体地球科学进展

《流体地球科学进展》编委会 编著

地震出版社

地震科学联合基金资助

# 流体地球科学进展

《流体地球科学进展》编委会 编著

地震出版社

1999

7

## 内 容 提 要

本书是为纪念和祝贺中国地球物理学会流体地球科学委员会成立而编著的论文集。共收集论文 21 篇。

论文作者就壳-幔流体与自然灾害、流体与油气矿产资源、流体地球科学研究方法、技术、发展趋势及展望等问题进行了较为深入的阐述。

本书可供从事流体地球物理、地球化学及灾害、环境、资源等研究人员和大专院校师生参考。

### 流体地球科学进展

《流体地球科学进展》编委会 编著

\*

责任编辑：吴 冰 马 兰

责任校对：庞娅萍

**地 震 出 版 社** 出版发行

北京民族学院南路 9 号 邮编：100081

中国地质大学彩印厂印刷

\*

787×1092 1/16 12 印张 307 千字

1999 年 7 月第一版 1999 年 7 月第一次印刷

印数 0001—1000

ISBN 7 - 5028 - 1675 - 5 / P·1007

(2168) 定价：22.00 元

## 《流体地球科学进展》编委会

主任：杨玉荣

副主任：杜乐天 沈照理 毛桐恩

委员：杨玉荣 杜乐天 沈照理 毛桐恩

尤惠川 谢鸿森 孙 雄 宋臣田

王伟元 吴 冰 马 兰

祝賀流傳地球科學委員會成立

發展流體地球物理科學  
為國民經濟建設服務

九八年十月

孫光昆



## 序

近一二十年，大陆深钻揭示了上地壳下部存在自由流体；深地震探测和大地电磁探测揭示了大陆岩石圈层内普遍存在低速层和高导体；还有，地震波 CT 成像技术揭示了地幔冷热参数结构的普遍性，这些都直接或间接地证实地下深部存在相当广泛的“流体”。同样，火山喷发物和来自地下百公里上下的深源包体中所包含的气体和液体更是直接的证明。这些事实在本书中已有初步而广泛的报道，同时对它们在固体地球科学诸多方面的理论和实用意义也有相当深入的讨论，这说明包括浅部和深部全面的流体地球科学，在我国已步入初创勃发阶段。

广义的地下流体，可包括气相、液相和潜液相；壳内和壳下；低温和高温；常量组分和非常量组分。它们的运动状态也可以从吸附态、渗流，直到涌流和射流。它们既是地壳和地幔内普遍存在的物质组成和环境因子，同时又是地壳和地幔变动中物理的和化学的多种动态信息的载体。

地下流体的赋存状态和地球的圈层结构和岩石结构密不可分，所以，流体的动态通常是固-流混相结构体在统一的地球动力作用下，发生固-流组合运动的过程中展现出来的，包括固相结构的变形及断裂和流体的受迫运动，因此，我建议有必要建立统一的地球构造流体运动的概念，为进一步发展地球构造流体动力学打下基础。

本书所涉及的科学问题和领域相当广泛，在理论方面，涉及多种状态下的流体在多变量物化条件下的基本特性、固-流相耦合作用，以及地震和火山成因、构造流体动力学的基本问题。在应用方面，则涉及地震和火山预报、油气成矿等。实际上，如果我们充分注意到地下深部热流体向上广域的穿层效应，它们以其特有的深部流体组分和高压载热状态，穿入岩石圈、穿入地壳下部、穿入地壳、穿入海洋、穿入大气；同样，地壳内早期演化赋存的流体，也可以产生类似的穿层效应。总之，来自幔内和壳内的流体，广泛穿层其结果可以导致一系列重大事件的发生。如果它们在地壳内与围岩发生流岩

相互作用，在适当的条件下停积下来，即可能形成某些矿种富集区；也可能对已存矿点进行重熔再富集。壳内高导体和多震层的双相力学行为可能对地震的蕴育和发生具有普遍意义。深部流体穿入海洋，以其特有的成分和热容量，直接影响海洋的物理环境、化学环境和生态环境，进而影响海水中 C、O、Ca 之类元素的化学平衡和排放、沉淀，成为影响大气成分和环流热源补给的重要底边界条件，影响厄尔尼诺信号强弱。总之，构造流体的广域穿层效应可能是认识当今人类至为关注的地球生存环境与灾害、资源问题，十分重要的因素。它可能是地球系统科学中最为基本而活跃的要素。1988 年 10 月，我们组织了一次重新认识 Larson 1991 年提出的中白垩纪地球整体事件的研讨会，从中使我们进一步确定了深入研究“地球整体动态环境与地下构造热流体广域穿层效应”的迫切性。

预祝流体地球科学委员会工作的顺利开展，团结更广泛的与地球构造流体科学交叉相关的科学领域，为中国流体地球科学的昌盛作出更大的贡献。

马宗晋  
1999.1.4.

# 目 录

## 综合论述

- 流体地球科学发展趋势展望 ..... 杨玉荣 ( 3 )  
我国地幔流体研究现状与展望 ..... 中国地球物理学会流体地球科学委员会筹委会 ( 15 )

## 壳 - 幔流体与自然灾害

- 震源层与地震流体 ..... 毛桐恩等 ( 27 )  
地球排气作用与自然灾害 ..... 杜乐天等 ( 36 )  
流体是地震前兆复杂性的根源 ..... 杨玉荣 ( 47 )  
斜列断层构造的地震破裂作用与机制 ..... 尤惠川等 ( 54 )  
气体致震——一个可能的地震成因 ..... 杜乐天等 ( 67 )  
卫星遥感热红外地震预报的统计模型 ..... 尤惠川等 ( 76 )  
地下流体短期异常与地震活动性指标关系的研究 ..... 刘耀炜等 ( 83 )  
加卸载响应比在地下水位研究中的应用 ..... 张昭栋等 ( 90 )  
隐爆地震浅析 ..... 白恩胜 ( 103 )

## 流体与矿产资源

- 多期次油气成藏与油气资源再发现 ..... 冯 乔等 ( 111 )  
同沉积断裂与盆地流体成矿成油的关系 ..... 刘建明等 ( 116 )  
含油气系统模拟方法分析 ..... 王伟元等 ( 122 )

## 流体基础科学与方法技术研究

- 构造流体动力学研究的若干基础问题 ..... 孙 雄 ( 131 )  
关于沉积盆地水研究的几个问题 ..... 文冬光等 ( 142 )  
我国近代火山和构造活动区的现代氦释放特征 ..... 上官志冠 ( 148 )



上地幔的流体组分 .....	储雪蕾等 (152)
山东海岛黄土古地磁及古环境 .....	李培英等 (158)
地震短临预报的小卫星系统 .....	强祖基等 (168)
超临界水的物理化学性质及意义 .....	苏根利等 (173)

## 附录

流体地球科学委员会筹备组第一次会议纪要 .....	(181)
---------------------------	-------

## 综合论述

从国内外地球科学研究发展趋势来看,地球科学家已接受了“地球系统科学”的观点,认为全球变化是地球几个圈层之间相互作用和反馈的结果。而圈层之间相互作用和反馈的媒体则是地球流体,唯有流体可以同时活跃和贯穿于几个圈层之中。因此,地球科学已由以固体地球科学研究为主向固体地球科学与流体地球科学研究并重发展。科研实践表明,流体地球科学愈来愈显示出它具有极强的生命力。

本专题重点阐述了以下几方面问题:

(1) 何谓流体?不同专家学者根据不同的研究领域或流体在其研究领域的特殊作用有不同的认识。本文将地球流体暂定义为:凡存在于地球系统中无一定形状、能流动的气态、液态、超临界态和熔融态的物质统称为地球流体。

流体普遍存在于地球各圈层中,已被钻探、包裹体研究、火山及温泉研究、深部地球物理探测、高温高压实验研究以及一些大尺度的空间对地观测所证实。

(2) 流体研究在地球科学研究中的重要地位和作用。流体对地球系统的演化,特别是对地球系统物质和能量的再分配及其由此而引起的各种地质事件具有控制作用、营力作用和源动力作用等。流体科学在地质学、地球物理学、地球化学及地球动力学之间起到媒体、纽带和桥梁作用。

(3) 流体地球科学发展的动力。当今面临世界人口爆增、资源匮乏、环境恶化、灾害频发等危及人类生存和可持续发展的严重挑战,用传统地质学或传统地球科学概念下形成的理论、模式和方法,难以解释现代人类面临的这些地学问题,难以解释地球演化和地球各种尺度的动力学问题,这就是流体地球科学应运而生的动力。

(4) 流体地球科学研究的基本思路:整体与演化观;全球观;相

互作用观；复杂性观；学科交叉融合统一化观。

(5) 流体地球科学研究的主要内容：地球的起源和演化，流体地球与固体地球的相互作用，地球整体动态环境与地球流体广域穿层效应、资源、环境、灾害等问题。

# 流体地球科学发展趋势展望

杨玉荣

(中国地震局数据信息中心 北京 100045)

## 引 言

现在不会有人怀疑流体是地球的重要物质组成部分。但是,对地球流体的研究远不如对固体地球的研究受到重视。对流体的研究长期处于分散状态。由于历史的原因,习惯上把分布于地球表面以外的大气、海洋(亦应包括地球表面其他水系)称为地球流体,其系统研究成果瞩目并在气候、天气预测预报、航天航海、气象和海洋资源开发以及地球动力学研究等方面广泛应用。而另一部分则称地球内部流体。在地球内部流体研究中当属水文地质学研究比较系统。水文地质学在地下水基本成因类型、对古水文地质学的基本特点以及对水-岩相互作用的机理和控制因素等方面的研究成果(王焰新等,1996),对地球内部流体成因及其地质作用的研究起了重要作用。70年代末,国际上兴起水-岩相互作用研究,取得进展,打破了传统地质学仅研究固体物质的做法,认为水-岩反应可能成为多种地质作用的控制因素。Fyfe等(1978)首次发表《地壳中的流体》(Fluids in the Earth's Crust)一书,比较系统地阐述了流体在变质作用、构造作用和化学迁移过程中的意义,并将处于流变状态下的固体岩石看作是流体;强调流体在地壳运动中的作用;支持板块运动机制的气垫说。80年代以来,国际上出现以研究变质流体为主的高潮,主要集中在流体成分,流体和岩石相互作用上;一些发达国家多次召开专门讨论流体-岩石相互作用和地质流体(沈照理等,1994)的学术会议。80年代后,几乎所有国际性地学会议无一不涉及流体问题,国际地质大会从第27届开始,每届均设有专门对流体研究讨论。讨论流体与成岩成矿、流体活动与元素迁移、流体与灾害、流体与环境等关系,以及流体来源与成因,涉及地质学各个领域。

总结国际地学界从50年代至90年代初实施的一系列大型地学合作研究计划(李兆麟等,1996;李院生等,1997),认为,虽然取得了丰硕成果,但几乎均未将流体作用看作是其中的一个端元而放在地球动力学演化系统中去研究。因此,诸如地球科学界普遍瞩目的“国际岩石圈计划”等并未如人们所期望的那样取得突破性进展,原因除大陆岩石圈的演化和动力学过程远比原先预想的复杂得多之外,对流体作用重视不够也是重要的原因。其实,之所以低估大陆岩石圈的演化和动力学过程的复杂性,其根本原因,是低估了或者说还没认识到流体在地球系统中质量和能量再分配过程以及由此而引起的一系列地质事件中的控制作用、营力作用和源动力作用。

90年代以来,一些发达国家如美、英、日等将流体研究列入了地学研究计划或开拓性研究领域。如美国,已将流体作为国家大陆动力学研究的重要内容之一。一些国际地学

组织纷纷开展多项与流体有关的国际合作研究项目。近年来,中国自然科学基金会亦开始资助有关流体的研究项目,使研究不断深入。为了推进流体在地球科学研究中的多学科交叉、融合、联合作用,1995年中国地震学会批准设立了地震流体专业委员会;1997年中国地球物理学会批准设立了流体地球科学委员会。流体研究在地质学各个学科领域越来越引起科学家的关注。

何谓流体?不同专家根据不同的研究领域或流体在其研究领域的特殊作用有不同的说法。Wyllie (1991)认为流体应包括熔体、液体( $H_2O$ )、气体( $CO_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ 等)、超临界液体及未确定流体相。张哲儒(1996)认为流体包括挥发组分的液相、气相及其超临界相,而且主要是含水体系。而在地质研究中常把含挥发组分的液相、气相及其超临界相和硅酸盐熔体统称为流体,但有时又不包括硅酸盐熔体。孙文淮(1996)认为地质研究中的流体是指流体相,包括液体、气体和硅酸盐熔融体。陶于祥(1994)认为所谓流体,一般而言是指存在于大气圈、地面与以下特定范围内的以水为主含有超溶性气体( $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $H_2S$ 、 $HF$ 等)、简单离子( $H^+$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$ 等)以及络阴离子的气体或液体;狭义流体则单指存在于矿物岩石微观晶格、裂隙、宏观构造(节理、断裂、褶皱等)中的“地质流体”,简称流体。杜乐天(1996)在研究地壳流体与地幔流体的关系时则称其文中流体只指气相与液相,不包括浆相。国际上“地质流体”学术研讨会(1993)则将地质流体的概念定为包括油、气、成矿溶液与地下水四部分。经综合各种说法,认为凡存在于地球系统、无一定形状、能流动的气态、液态、超临界态和熔融态的物质统称为“地球流体”。其最大特点是在流动过程中,不仅能改变自身的性状和物理化学性质,而且对与其相接触的物质具有营力作用,即改变其性状和物理化学性质。当然,在同王先彬(1998)讨论时提到,比如水和蒸汽是流体,但在常压零度以下结成比水的密度小的冰雪或在超高压下水呈固体结构(1996年7月17日《科技日报》),比水的密度高的物质,还是流体吗?固态 $CO_2$ 和 $H_2$ (毛河光在1989年在超高压实验中将氢气转变成固体金属物质)还是流体吗?一般认为铁是固体,但在地核中的液态铁是固体吗?熔化以后的金属是固体吗?等等,所以研究流体应特别注意相转变问题。

总之,随着新地球观的形成和发展,流体的研究日益被科学家所关注,在大气、海洋、地表流体、地质流体——盆地沉积流体、变质流体、岩浆流体、成矿流体、构造流体、灾害流体、地幔流体、核幔流体以及动力学研究等方面,取得了丰硕成果。本文不想也不可能全面地综述所取得的进展,但在这些研究进展中,更多地是研究流体的存在和流动形式受控于构造变形、岩浆作用、沉积作用、变质作用等地质过程动力学条件;但已有不少新资料、证据、思路,认为在地球系统中所发生的质量和能量再分配及由此而引起的一系列事件,流体起着控制作用、营力作用和源动力作用。因此,对后者仅进行挂一漏万的归纳,以期向固体地球科学那样,逐渐推进流体地球科学的形成和发展,为解决人类所面临的资源、环境、灾害问题和地球科学的发展做出新贡献。

## 一、流体普遍存在于地球各圈层

地球各圈层普遍地存在流体,已逐渐被钻探、包裹体研究、火山及温泉研究、地球物理探测、高温高压实验研究以及一些大尺度的空间对地观测所证实。

## 1. 地球外部流体

在地球表面以外, 普遍存在着直接可见的海水、其他地表水、空气及水汽。

## 2. 地球内部流体

### 1) 地壳流体

对地壳浅部流体的认识主要来源于浅钻。以满足用水和开采油气资源为目的浅钻, 已证明地壳浅部普遍存在着淡水、海退封存卤水和油气藏。

随着大陆超深钻和海洋深钻的开展, 对流体存在的深度有了突破性的认识。在原苏联克拉半岛 12 262 m 的超深钻孔中, 发现在 12 km 多的地壳范围内的各个深度上都存在着大量的以自由水为主的流体, 而且随深度的增加, 这种流体不是减少而是增加; 不仅有晶格内和颗粒边界运移方式, 而且发现了很多像地表流体流动方式的深部流动, 同时随深度的加深, H、He 及 CH<sub>4</sub> 等气体含量也增加, 这说明流体存在的深度远不止 13 km。同样, 在德国的 KTB 超深钻, 深 9 101 m, 位于副片麻岩类和变质基性岩带, 发现钻孔深部存在惊人的大量游离流体, 钻井泵抽实验数据显示了深部流体可以从很远的和渗透率高的部位流入钻孔, 且充满游离流体的破碎带或含流体层达 20 多层, 为富含烃的“干”流体与富含盐 (Ca - Na - Cl) 的热水流体, 并强烈地进行着热液蚀变作用。在带有摄像头的大洋深钻孔中亦观察到不断涌出的孔隙流体, 不仅说明流体的客观存在, 而且证明在地壳深部仍存在流体运移的通道。大陆、海洋深钻发现深部游离流体的存在及运移, 这一重要成果打破了传统的和现今仍被经常引用的地壳深部是干的、紧密的、压实和不渗透的假设。

此外, 大量同位素研究表明, 地表流体可向地壳深部渗透, 达 10 ~ 15 km 或在更深的深度上大规模循环, 迁移距离可达几百乃至上千公里。

### 2) 地球深部流体向海洋、地表、大气排放

现代火山喷发过程就是把数量可观的流体 (H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、H<sub>2</sub> 和稀有气体等) 从地球内部带出来的过程。研究认为, 玄武岩岩浆来自岩石圈之下的软流层或更深, 最深可达核 - 幔界面。火山喷发可视为研究地球深部物质的天然超超深钻。

分布极其广泛的温泉也是地球内部热水溶液和挥发性气体进入地表及大气的重要通道。

海底热液活动的观察与研究自 70 年代在大西洋的 TAG 热液区发现海底热泉和低温热液矿床后, 现今已成为美、法、德、日、加、澳等发达国家争相研究的领域, 陆续发现: Galapagos 扩张中心的海底热泉和热液喷口生物群; 东太平洋正在活动的高温热泉和停止活动的块状硫化物矿床; 东太平洋超快速扩张脊正在活动的全球最大的热液云团、黑烟囱式块状硫化物矿床, 海底热泉、气泉广泛存在; 调查估计, 来自地球深部的物质和热液, 约 80% 是通过热液活动在洋脊排放; 据专家对陆上和海底火山喷出 CO<sub>2</sub> 量的实测和估算, CO<sub>2</sub> 约为  $n \times 10^{12}$  mol / a, 涂光炽认为 Berner (1990) 对全球陆、海火山 CO<sub>2</sub> 排放量估算为  $11 \times 10^{12}$  mol / a, 可能更接近实际 (1996)。从以上火山、温泉和海底热液活动的调查和观测, 表明了地球深部存在着大量流体并不断向地球表面和大气排放。

### 3) 地幔流体

自 1971 年 Touret 首先在挪威南部研究了麻粒岩中的流体包裹体, 发现大量 CO<sub>2</sub> 流体的存在, 改变了人们长期认为的传统变质作用是脱挥发分的过程, 从此研究地球内部流体

越来越受到重视。王鸿祯(1996)主编的《地学前缘》中《地球内部流体》专辑及本书中《我国地幔流体研究现状与展望》一文都有较系统地介绍,从不同角度论证从地壳到地幔普遍存在流体,而且在地表已取得标志地下200 km左右深度的上地幔岩包裹体样品,发现其中含有大量以 $H_2O$ 、 $CO_2$ 为主的C、 $H_2$ 、 $O_2$ 、S、N等流体。近年来美国高压中心T. Gaspari等在20 GPa(相当于地下400~600 km深度范围)、1600℃条件下合成了含水镁硅酸盐新相(B相),对地幔中水的存在深度和成分做了进一步修正。中外文献报道的地幔流体,可能是一种富含氢、卤素、碱金属、碳、氧、氮和硫的复杂化合物系统,称为幔汁(杜乐天,1987)。路风香等(1996)研究金伯利岩中有大量缺氧矿物,从而证明存在“超深流体”,有可能来自核-幔边界或外地核氢气圈。流体包裹体成为研究地球深部物质的“探针”。

#### 4) 超深流体(核-幔边界、外地核流体)

板块构造学说是地球科学发展的一个里程碑,但接踵而来的就是板块运动的驱动力问题。现研究认为板块运动是地幔对流驱动的;其中主要没解决的,且与板块运动有关的难题是流体存在的深度问题,但已由地震的不均一和多种实验表明,核-幔界面可能是地幔对流的下界线层。而地核外层被认为是一个巨大的岩浆房,以液态铁为主,并溶有约10%的以氢为主的轻元素,弹性刚度小且近似于水的粘度,已被地震和射电天文观测所证实。

杜乐天(1993)认为,气、液、浆以气为本,液和浆均为气的派生物,故将岩浆作用、热液作用、变质作用、沉积作用和大地构造作用等地质作用视为地球排气的具体表现形式。他将地球自外向内分为五个气圈:地球表面以上的习称大气圈(I)、上地壳(地表以下6~7 km)气圈(II)、中地壳(地下8~10 km以下)气圈(III)、上地幔(壳-幔边界以下)气圈(IV)和地核外层(溶巨量氢的液态铁)气圈(V)。

## 二、流体研究在地球科学中的地位与作用

如前所述,流体在地球各圈层中普遍存在,虽然尚未形成流体地球科学体系,但在地球各分支学科研究中已逐渐形成热点前沿,不论是在理论上还是实际应用研究上,都越来越显示流体对地球系统的演化,特别是对地球系统中的物质和能量再分配及其由此而引起的各种地质事件的控制作用、营力作用和源动力作用等。而且越来越显示流体科学在地质学、地球物理学、地球化学及动力学之间的纽带和桥梁作用。

### 1. 深部地球物质与动力学研究都强调流体的作用

过去通常把地球动力学仅仅认为是固体地球动力学,往往不包括大气动力学、海洋动力学、大气-海洋对岩石圈动力学以及地球内部动力学等问题。陈德辉(1997)在从大气学科看地球科学中跨学科合作问题中,谈到大气科学发展现状和存在问题时,认为在天气灾害预报中存在“10天预报的‘屏障’难以突破”,虽然原因是多方面的,但最根本的原因可能是时至今日大气科学的很多研究工作只着眼于或只侧重于“大气圈内”寻找解决问题的办法,而未能(或至少未能很好地)把“大气圈的问题”置于由水圈、冰雪圈、生物圈、岩石圈(乃至地球各圈层)和大气圈组成的整体地球系统中去考虑,从根本上把大气的变化看作是地球系统变化在大气圈的反应。近年来,从地球动力学角度研究大气-海洋动力学、大气-海洋-陆地动力学,即研究气-海-陆交界面上能量、质量和动量的交换

和相互之间的影响过程和变化规律,不仅用于预测海-气系统异常变化和气候变化,而且发现大气角动量变化对地球自转速度有影响;海平面变化对岩石圈构造变化有影响;地下热物质上涌、火山喷发和地球放气对海-气相互作用有影响(杜乐天,1996;马宗晋等,1997)。以上这些研究将会大大地推动大气-海洋和地球浅部动力学研究。

板块构造学说的诞生对地球科学的发展具有划时代意义。为了研究板块运动的驱动力问题,引导地球科学家将注意力投向了大陆动力学和地球更深的圈层——地幔和地核。掀起如下一些研究热潮,如:地幔对流(陆现彩等,1998)、壳-幔物质与深部过程(邓晋福等,1998)、地幔流体(杜乐天等,1997)、流体作用在地球动力学演化过程中的意义(李院生等,1997)、地幔动力系统与演化(周瑶琪等,1998)、大陆动力学与大陆地质构造以及壳-幔-核边界的深部过程等固体地球动力学问题(於崇文,1998)、深部物质与深部过程(杨学祥等,1998)、地球内核与地球深部动力学(宋晓东,1998),等等,都从不同的角度论证了流体的存在及运移对深部过程的影响。美国著名科学家组成的国家研究委员会出版了《地球物质研究》(谢鸿森等译,1991),指明了当前地球物质研究领域三大主题:

(1) 地幔对流——认为是在整个地质历史过程中地幔对流是板块运动、火山和地表活动以及地壳地幔物质再分配的驱动力。

(2) 流体流动——认为流体在熔融、侵入、交代、变质以及成矿作用过程中发生迁移,进而使地壳地幔物质重新分配,并影响岩石的各种性质,包括波速、岩石电阻率、岩石强度和渗透性等。

(3) 大陆演化——开展代表全球性大陆物质的研究,以真正了解大陆的成因及演化过程。

以上三大主题研究,总体上认为,流体在地球演化中所起的作用是广泛的,而且具有深远的影响。

随着探测技术、实验技术和计算机技术的迅猛发展,使得人们对地球内部不均一性、各种不连续面的客观存在、各圈层之间的物质和能量的交换、动力学耦合等相互作用的认识在不断深化。美国有关深部研究委员会近年来的研究结果显示出地球内部在各个深度和各种尺度上的非球对称性——呈现一个动态的地球内部表征,上、下地幔有明显的物质交换,岩石圈的俯冲可能一直深入到下地幔底部,核-幔边界可能发生着剧烈的化学反应、物质和能量的交换,液核对流产生的磁场直逼地球真实磁场,地球圈层间存在差异运动,1996年首次观测到地球内核相对于地表独立转动,并比地球表面转速略快。所有这些密度不均一、物质和能量的交换、圈层间差异运动等,根本上是由于流体的流动产生的,或说其源动力就是流体作用,地球内核之所以能旋转就在于它处于粘滞度极低的液态外核中。

## 2. 地球内部流体研究

地球内部流体由于学科研究侧重面不同,又常常分为:

地壳流体(又称地质流体)研究——主要是研究地壳及壳-幔边界以上岩石圈范围的流体作用,研究最广泛最活跃,与人类圈赖以生存的资源、环境、灾害问题关系最密切。后面仅就地球内部流体对地质构造、成矿、灾害的作用的研究中所见到或体会到的一些新资料、新认识作挂一漏万的介绍。



深部地幔流体研究——其以壳-幔以下的整个地幔中的流体作用研究为主，以对包裹体研究和地球物理探测结果为基础，用高温高压实验结果和大型计算机数值模拟作检验。本文集中已有地幔流体研究和前面所述深部物质研究内容，此处不再重述。

超深流体研究——一般认为是核-幔边界以下到地核，尤其以含有大量轻元素的液态铁外核为主的研究，前面已述及，亦不再作介绍。

#### 1) 在地质构造运动中的作用

构造和流体关系的研究由来已久，但传统的流体力学和渗流力学往往只研究流体在假定固体介质骨架不可变或只有简单压缩的情况下的运动；传统构造地质学则只强调地球固体介质在力的作用下的变形及其过程，强调流体的存在和运动形式受控于构造变形，而很少考虑流体的作用。实际上，不同尺度的构造活动都显示了流体的营力作用，在全球构造尺度上，钱维宏（1996）为寻找全球大地构造力源，研究了全球构造与地球内部流体的关系，认为流体外核和固体内核之间始终发生着角动量的交换，产生圈层间的差异旋转速度，而流体外核层的相对运动导致地壳或板块的破裂和运动，经过地质演化阶段的多期次往复运动形成了现今的全球构造特征。在单一构造尺度上，例如剪切带流体（钟增球，1996）、断裂带流体（解习农等，1996）、俯冲带流体（张泽明，1996）、陆内碰撞体流体作用（陈衍景，1996）、盆地沉积流体（文冬光等，1998）、造山带流体等，不再仅强调这些构造活动产生流体，而更强调这些构造活动中强烈地水-岩反应对构造活动的方式、规模、速率等的动力作用。在微观尺度上，岩石矿物颗粒边界软化，颗粒间位移、滑动、蠕动，流体包裹体的爆裂等，亦显示了流体的源动力作用。因此流体在地质构造运动中（杨巍然等，1996）的作用和意义就在于影响岩石的变形特征，促进构造的发生和发展，有利于判断构造环境和构造变动年代的定量确定。为了研究和解释构造活动中所普遍反映出来的动态性、非均一性、不可逆性、非线性和非稳定性的问题，构造流体动力学应运而生（孙雄、马宗晋等，1996），该学说强调了流体既是地球的物质组成，又是物质和能量的载体，地质作用及其过程是地球固体介质和其中的流体共同作用的结果，并突出了流体在地球系统中的物质和能量再分配中的控制作用，以及在由物质和能量再分配而引发的一系列事件中的营力作用，给传统的固体地质（地球）模式提出了严重的挑战。构造流体及构造流体动力学对地球动力学、矿产资源的形成、勘探开发、地震的成因与预测研究有重要意义。

#### 2) 在成矿中的作用

成矿与流体始终是放在一起研究的。但过去长时间以来，偏重于研究矿体和围岩附近，通过对控矿地质因素（如地层、构造、岩石、矿石、矿物）和地球化学特征的调查、描述和总结，探讨矿床成因和形成过程，对多数地表矿、易识别矿的勘察和找矿富有成效，但对埋藏较深的矿、隐伏矿和难识别矿的勘察和评价遇到了困难。原来的找矿标志显出局限性而失去原有价值；矿床的发育、分布与地质构造环境之间的关系研究，不能完全适用于各种比例尺的成矿预测，尤其不适于深部、隐伏矿乃至矿质远距离异地堆积矿的预测与找矿。提出了流体成矿系统和成矿作用的研究（贾跃明，1996），强调各种成因流体在运移过程中，对围岩中的成矿源元素的活化、搬运和富集作用。出现了一些探索新的成矿理论的窗口。一是地幔流体成矿说，认为地幔流体穿过上地幔和莫霍面，在适当的物理化学条件下，与岩石圈地壳物质（变质岩、火成岩、沉积岩、矿层等）相互作用产生了挥