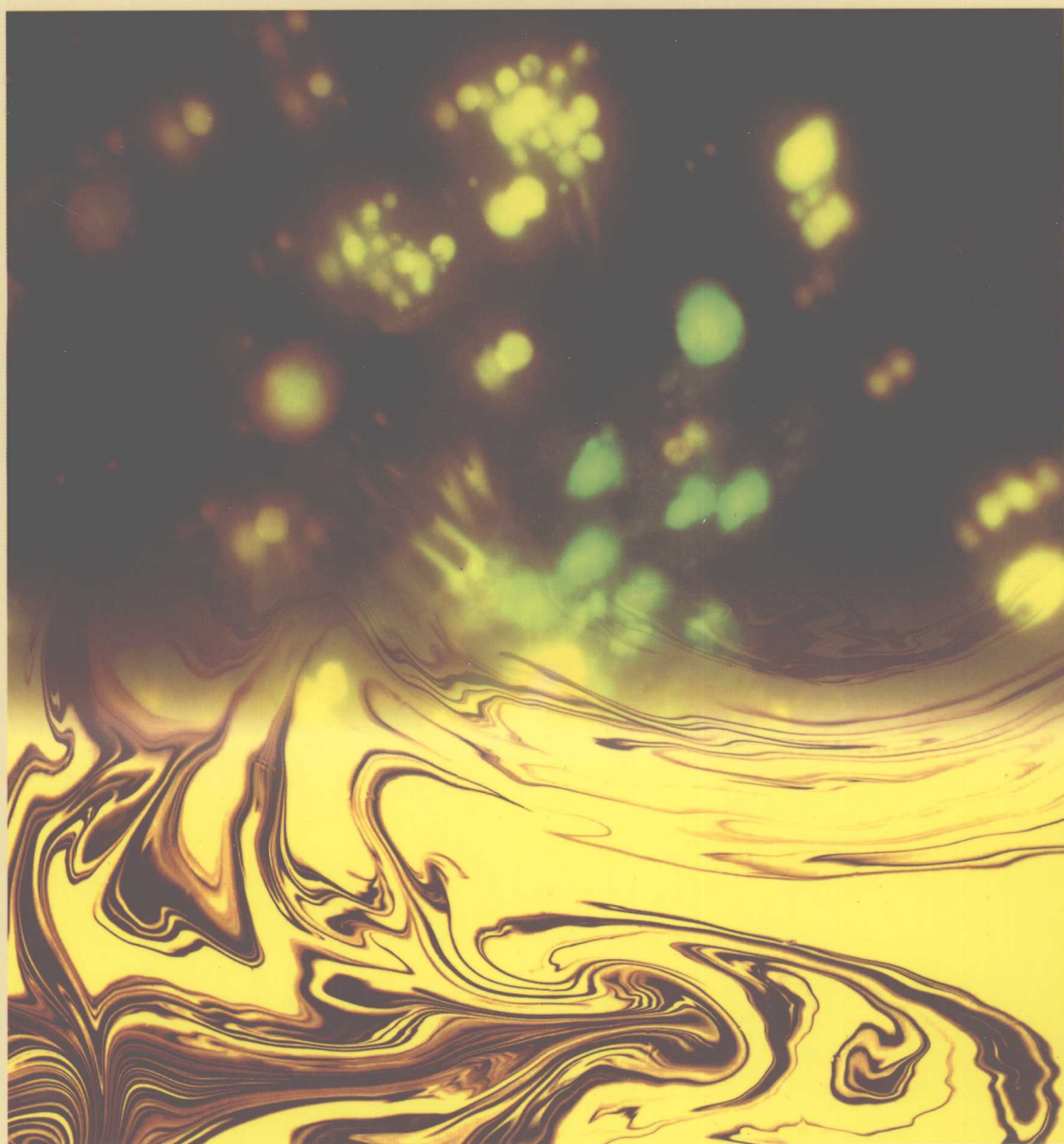


油气包裹体

及其在石油勘探和应用中的应用

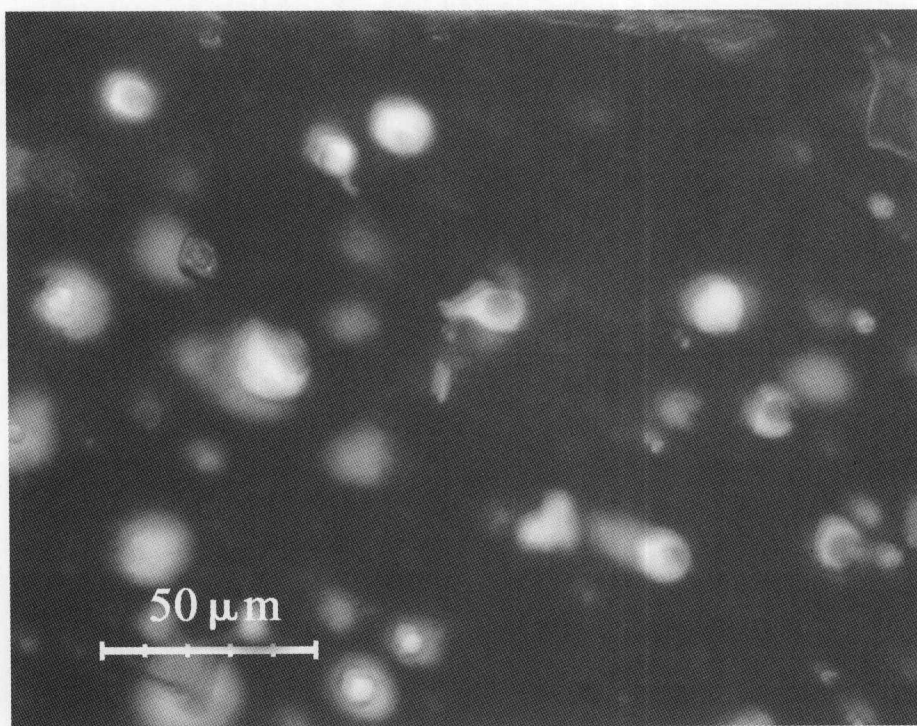
刘德汉 卢焕章 肖贤明 著



广东省出版集团 广东科技出版社

油气包裹体 及其在石油勘探和开发中的应用

刘德汉 卢焕章 肖贤明 著



广东省出版集团
广东科技出版社
广州

图书在版编目 (CIP) 数据

油气包裹体及其在石油勘探和开发中的应用/刘德汉,
卢焕章, 肖贤明著. —广州: 广东科技出版社, 2007. 11
ISBN 978-7-5359-4421-4

I. 油… II. ①刘… ②卢… ③肖… III. ①石油-液包
体-研究②天然气-油气包裹体-研究 IV. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 139135 号

责任编辑: 袁 杰

装帧设计: 曹 磊

责任校对: 雪 心 罗美玲

责任印制: 严建伟

出版发行: 广东科技出版社

(广州市环市东路水荫路 11 号 邮码: 510075)

E-mail: gdkjzbb@21cn.com

http: //www. gdstp. com. cn

经 销: 广东新华发行集团股份有限公司

印 刷: 佛山市浩文彩色印刷有限公司

(南海区狮山科技工业园 A 区 邮码: 528225)

规 格: 787 mm × 1 092 mm 1/16 印张 17.375 字数 500 千

版 次: 2007 年 11 月第 1 版

2007 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 98.00 元

如发现因印装质量问题影响阅读, 请与承印厂联系调换。

中国科学院广州地球化学研究所
有机地球化学国家重点实验室和
国家杰出青年基金 40625011 资助

内 容 简 介

本书系统地介绍了石油和天然气包裹体形成机理、类型划分、相演化特征,以及应用油气包裹体寻找石油和天然气的原理;地层中油气包裹体观测研究的均一温度、冷冻温度测定;油气包裹体组成的显微荧光、显微红外、显微激光拉曼和油气包裹体群的 GC、GC-MS 的分析,以及油气盆地中石油包裹体和盐水包裹体在探讨油气生成、运移、聚集的古地温、古压力与成藏演化阶段中的应用。本书适于广大油气地质勘探的科研人员、地质和石油地质院校师生以及流体包裹体工作者阅读。

前言

矿物生长过程中所圈闭的流体叫做流体包裹体,保存了当时地质环境的各种地质地球化学信息(如 P 、 T 、 pH 、 X 、盐度等)。地质体中的流体包裹体多是微米级的观察和研究对象。流体包裹体中的成分和 P 、 T 是探索、了解相关地质过程(如成矿作用机制、流体运移通道、流体迁移过程中的演化等)的密码,流体包裹体研究的主要目的之一,即是通过包裹体中的古流体进行定性及定量分析,并用所获得的各种数据、信息来解释和研究地壳及地幔中的各种地质作用过程。流体包裹体的研究已广泛应用于矿床学、构造地质学、壳幔演化、地壳尺度上流体迁移、石油勘探以及岩浆岩系统演化过程等地学领域。并且是目前地球科学研究中最活跃的领域之一(卢焕章等,1990)。

油气包裹体是流体包裹体中的一类,而且是很特殊的一类。油气包裹体是在油气成藏过程中在沉积矿物的次生加大边,裂隙愈合和(或)胶结物中捕获的油气物质,油气包裹体常与水溶液包裹体共存,两类流体包裹体的研究在油气地质学中都有重要意义。

油气包裹体的研究虽然起步较晚,但最近20多年来日益受到石油地质学家的重视,成为研究油气藏机理的一种有效的方法(HONER, 2005)。油气包裹体应用于不同地质时代的油气藏研究中。在世界上,澳大利亚联邦科学和工业研究组织(CSIRO)、法国HENRI POINCARÉ大学、法国铀矿地质研究中心(CRREGU)、英国NEWCASTLE大学、美国FIS公司等著名研究单位在油气包裹体测试技术与研究方面取得了重要突破并取得了许多成果。我国学者(施继锡等,1987;刘德汉,1995;刘斌,2005;张文准,2005;张鼎,2005;欧光习等,2006;王飞宇等,2006)也做了大量的研究工作,并取得了许多成就。

近几年来,我国和世界油气包裹体研究取得了许多进展,这包括:

(1) 石油包裹体的共聚焦激光扫描显微镜-CLSM(Confocal Laser Scanning Microscopy)和更先进的SHGM(Optical Second Harmonic Generation Microscopy)对多种流体包裹体三维形态和体积气液比的精确测定与 PVT_{sim} 模拟计算相结合,可以了解单个油气包裹体中石油 C_1 到 C_{20} 以上的碳氢化合物的组成特性。

(2) 石油包裹体岩相学观测与包裹体有机地球化学的综合研究相结合,更有效地鉴别石油的生成和热演化阶段;剖析石油从含油地层中迁移到储油层的聚集成藏过程和充注期次,以及为油源对比、油藏的后期变化与原油的生物降解研究等提供了科学依据。

(3) 各种烃包裹体捕获温度与捕获压力的热力学计算方法与油气地质中应用阐明了很多油气藏的成藏期次和成藏条件。

(4) 利用油气包裹体信息指导寻找石油。例如：美国许多铅锌矿床产在密西西比河流域，在研究这些矿床时发现其成矿流体中有许多石油，从而使石油地质学家在这些矿床的底部构造中找到了石油。但是石油的迁移需要有一个过压（Over Pressure）区，如何用流体包裹体来确定这个过压区是一个十分重要的研究课题。过压区不仅对油气田，而且对一般地壳中流体的迁移也是十分重要的。

(5) 流体包裹体地层学分析（Fluid Inclusion Stratigraphy）。即对钻孔储层的密集取样进行在线色谱-质谱的包裹体有机和无机组分的快速分析与流体包裹体的鉴定相结合。在评价与开发北海油田、美国得克萨斯和密苏里的油田，以及揭示我国南海流花油气运移、聚集方面均获得很大的进展。美国的 FIT 公司对南密苏里盆地采用流体包裹体地层分析方法寻找石油，对一个深达 3 330 m 的新井做了试验，表明该区地面以下 2 300 ~ 3 000 m 的地方存在石油。

(6) 石油包裹体丰度测定的 GOI（Grains Containing Oil Inclusion）值，对于判断储层中有没有油气聚集和鉴别钻孔地层剖面中的古-今油水界面等发挥了重要作用。

我国的包裹体研究从 20 世纪 60 年代起先后在中国科学院、地质部、冶金部和教育部的个别单位中开展，1972 年以后发展迅速。1977 年召开了全国第一次矿物中包裹体和成岩成矿学术会议，随后许多单位建立了实验室，改进和完善了包裹体的研究方法，同时结合地质工作对我国的金属矿床做了大量的包裹体研究工作，特别是近年来石油部门的很多单位广泛应用盐水包裹体和油气包裹体的研究成果解决石油地质中的理论和勘探实际问题，收到了较好的效果。油气包裹体的研究发展很快，在中国和全世界均取得很大的成就。本书综合了国内外有关油气包裹体的原理以及在油气勘探、开发和开采方面的资料，结合我国在流体包裹体观测方面的经验与有关研究成果，编写了油气包裹体与有关地质应用一书。由于作者水平有限，本书中之错误难免，敬请各位读者指正。书中引用了许多同行的部分资料，特别要说明的是书中引用了卢焕章、范宏瑞、倪培、欧光习、沈昆和张文淮 2004 年出版的《流体包裹体》一书中的部分章节和图件，特此一并说明和致谢。

在本书出版之际，正是国际流体包裹体研究大师 Edwin Roedder 博士——卢焕章的导师逝世 1 周年。Roedder 博士生前曾多次到中国讲学，对中国的流体包裹体研究作出了贡献。本书也是对他的怀念和敬意。

本书撰写分工：卢焕章负责前言、第一章、第二章、第五章第二节；刘德汉负责第三章；刘德汉、肖贤明负责第四章和刘德汉负责第五章的第一节、第三节、第四节。本书各章中应用的图表资料和各种照片与显微照片，除了署名的作者以外，其他未署名的图表和照片均为本书作者未发表过的实际材料。

本书在编写、编辑等方面得到卢家烂研究员、申家贵副研究员、田辉博士、甘华军博士、靳永斌博士、郭利果博士研究生的支持和帮助，本书的出版得到中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室和国家杰出青年基金 40625011 资助。在此一并致谢。

目 录

第一章 流体和油气包裹体研究的基本原理	1
第一节 地球中的流体	3
一、流体的定义	3
二、地壳中流体的分类	4
第二节 矿物中流体包裹体的定义和形成机理	9
一、流体包裹体的定义	9
二、包裹体的形成机理	10
三、原生、次生和假次生包裹体	12
四、包裹体捕获后的变化	15
五、流体包裹体研究的三个基本前提	18
第三节 沉积成岩过程中的包裹体	19
一、沉积成岩过程中的包裹体	19
二、从非均匀体系中捕获的包裹体	24
三、不混溶体系中的油气包裹体	27
第四节 油气包裹体研究的基本原理	29
一、油气包裹体的特征	30
二、油气包裹体的荧光	36
三、油气包裹体的分类	38
第二章 流体包裹体的相平衡和流体体系	45
第一节 流体相平衡和状态方程	47
一、体系、相、组分和自由度	47
二、相平衡和相律	48
三、稳定平衡和亚稳定平衡	49
四、状态方程和等容线	49
第二节 一元流体体系	52
一、 H_2O 体系	52
二、 CO_2 体系	59
三、其他一元(单组分)流体的性质	60
第三节 二元流体体系	64
一、盐- H_2O 体系	64
二、挥发分- H_2O 体系	72
第四节 三元流体体系	87
一、 $NaCl-CaCl_2-H_2O$ 体系	87

二、 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 和 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCl}_2$ 体系	90
三、 $\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{N}_2$ 体系	95
四、 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_4$ 体系	96
第五节 油气包裹体的 PVT 性质	98
第三章 油气盆地中流体包裹体研究的主要内容和方法	109
第一节 油气包裹体岩相学	111
一、油气包裹体光薄片的制备	111
二、包裹体光薄片的透射光和偏光显微镜观察	112
三、油气包裹体显微荧光观察	114
四、阴极发光显微镜观察	120
第二节 油气盆地中流体包裹体的均一温度测定	127
一、油气盆地中流体包裹体均一温度测定原理	127
二、油气盆地中流体包裹体均一温度测定条件和方法	128
第三节 油气盆地中流体包裹体的冷冻测定	130
一、油气盆地中流体包裹体的冷冻测定原理	130
二、油气盆地中流体包裹体的冷冻测定方法	132
三、流体包裹体气液比测定	134
第四节 油气包裹体组成测定	135
一、石油包裹体显微荧光和色度分析	135
二、包裹体组成的显微激光拉曼光谱测定	137
三、含烃包裹体组成的显微红外光谱测定	147
四、样品颗粒荧光定量	150
五、油气包裹体组成的色谱、热解色谱、色谱-质谱和同位素质谱分析	153
第五节 油气包裹体捕获温度、捕获压力的模拟计算	159
一、石油包裹体 PVTsim 软件模拟	160
二、PIT (石油包裹体热力学) 模拟	166
三、烃类包裹体热动力学参数计算的 VB 软件模拟	167
四、烃包裹体的 PVTpro 4.0 软件模拟	168
第四章 油气包裹体在油气地质中的应用	171
第一节 盆地成岩演化中的流体包裹体研究	173
一、沉积物成岩演化与矿物流体包裹体捕获条件	173
二、地层剖面中流体包裹体均一温度数据的解释与应用	175
三、流体包裹体捕获温度与捕获压力的关系	176
四、地层中流体包裹体均一温度与镜质组和沥青反射率关系	178
第二节 烃源岩中油气生成、运移的流体包裹体研究	185
一、碳酸盐烃源岩中的流体包裹体	185
二、泥质烃源岩中的流体包裹体	186
第三节 储层中的石油和天然气包裹体	189
一、砂岩储层中的油气包裹体和盐水包裹体	189

二、碳酸盐岩储层中的油气包裹体和盐水包裹体	190
三、火成岩或基岩储层中的流体包裹体	191
第四节 油气成藏演化阶段的流体包裹体研究	196
一、源岩生烃演化的流体包裹体研究	196
二、油气成藏阶段的流体包裹体研究	197
三、油气藏热演化作用的流体包裹体研究	202
四、油气藏古油水界面的判识	209
五、石油包裹体在油源对比中的应用	210
六、古油气藏的判识	211
第五章 流体包裹体在油气勘探、开发与其他矿床中的应用	219
第一节 颗粒荧光测定在油气勘探中的应用	221
一、包裹体研究油气运移和成藏作用的原理和指标	221
二、包裹体颗粒荧光在油气运移和成藏作用中的研究	222
第二节 流体包裹体地层学在油气勘探评价中的应用	224
一、流体包裹体地层学的概念与原理	224
二、流体包裹体地层学的主要技术方法	225
三、流体包裹体地层学的数据处理与应用	226
四、流体包裹体地层学研究和应用实例	231
第三节 油气田开发中的流体包裹体	245
一、油气储层中碳酸钙型垢中的含烃包裹体	245
二、油气储层中硫酸钙型垢中的含烃包裹体	245
第四节 油气管道设备垢矿物中的流体包裹体	247
一、管道设备中碳酸盐型垢矿物中的石油包裹体	247
二、管道设备中硫酸盐型垢矿物中的石油包裹体	249
三、管道设备中其他类型垢矿物中的含烃包裹体	250
第五节 金属矿床中的油气包裹体	251
一、寒武系汞矿床中的沥青和含烃包裹体	251
二、玄武岩火山热液型自然铜矿床中的沥青和含烃包裹体	253
参考文献	259

第 一 章

流体和油气包裹体 研究的基本原理

流体包裹体和它所反映的地质环境是多种多样的,对于代表岩石和矿床的形成条件、油气田形成环境的流体包裹体进行研究,目的是为解决岩石学、矿床学和地球化学等方面有关成因理论和勘探实践中的具体问题。研究矿物中捕获的流体包裹体,首先需要明确流体包裹体的概念、含义、形成机制以及一些科学假说和理论基础方面的内容。由于油气包裹体也可能捕获于不混溶体系,所以本章也要述及这方面的内容以及油气包裹体的若干基本原理。

第一节 地球中的流体

一、流体的定义

地球按其物理和化学性质可以分为若干圈层:大气圈、生物圈、水圈和岩石圈等。固体的地球又可分为地壳、地幔和地核。无论如何划分,在地球的各个圈层中均有流体存在,一个干的地球和一个有流体的地球,差别是十分明显的。例如,许多星球上没有 H_2O 这个流体因而不存在生物,所以说流体是十分重要的,简而言之,是流体给地球带来了生机。

地壳,甚至整个地球中存在着许许多多的流体,流体分布在各种地质环境中。在此先要给流体的概念下一个定义:一个在应力作用下发生流动,并且与周围介质处于相对平衡状态下的物体叫做流体。按照定义,地球中的流体有以下几种:

(1) 呈气体状态的流体——大气圈中的气体,以及存在于矿物、岩石、生物圈中的气体。

(2) 呈液体状态的流体——水圈中的流体(海水、河水、湖水、地下水、雨水、同生水、岩浆水、地层卤水和石油)、岩浆以及存在于流体包裹体中的液体。

(3) 被固定在矿物的晶格中或晶格之间的流体,就是常说的结晶水。

地球上的流体分布在大气圈、水圈、生物圈和岩石圈中。在大气圈中的流体是以气体形式存在的,在水圈中则呈液态,而在生物圈中的状态比较复杂,有呈液态的,也有呈气态的,在岩石圈中的流体以气态、液态和岩浆状态存在,而地幔中存在的是地幔流体。

地球各圈层中的液体并不是截然分开的,它们之间每时每刻都在进行着各种相互作用和循环。例如,在海气交互作用下海水蒸发进入大气圈,然后又以雨水形式降到大地。又如,岩石和水的相互作用等。

从这个定义出发,地壳中的水、岩浆、热液、空气、油气,甚至变形中的岩石均可作为流体来看待。但从地质角度,特别是成矿作用的角度来看,岩浆、水、油气和热液等则是直接研究对象(也就是说只述及液态和气态这一部分物质)。现在先来看看哪些流体在地质作用中是重要的。

第一是地幔流体。即由地幔分异出的流体和热量,它们是由气体和液体以及岩浆所组成的,在地球上部形成了热点、热流和热柱。

第二是海水。因为很多岩石和矿床是直接从海水中沉淀出来的,在沉积岩的孔隙中至今可能保存着这种古海水。

第三是卤水，也叫地层水或建造水。这种卤水存在于地层中，也见于较深的海底或者油田中。例如，红海海底的卤水以及美国加利福尼亚州的 Salton Sea 的卤水，甚至在海底也存在卤水，1995 年在大西洋中脊的 Mediterranean 就曾发现过三个卤水湖。

第四是地热水。在世界各地，沿着板块边界或构造线附近分布着各种地热田、温泉、喷泉和硫黄泉等，在这些地热水中可以观察到许多金属矿物和非金属矿物的形成。根据地热井资料，这些温泉和地热井下存在着很大的地下热水库。

第五是岩浆热液，即由岩浆分异出来的流体。

第六是雨水和地下水。大气降水落到地表而后进入地下或储存于地表湖泊、河流和蓄水层中。

第七是岩浆。有喷出地表的和侵入地下的，它不仅是一种流体，还由于其热量和能量而常常驱动许多地质作用的发生。

第八是变质流体。这是变质作用时形成的流体，包括变质作用时加入的流体，以及变质时因矿物脱水时放出的流体。存在于各种变质岩和矿床中。

第九是油气藏中的油气和油田水。

还有其他流体，这里不再赘述。从上述可知，地壳中存在的流体，从老到新均有，从地球深部到地表均可以见到。

地壳中流体的总质量，可从以下数据中估计：现在海水质量为 1.4×10^{24} g，地壳的质量是 23×10^{24} g，如果假定地壳中的含水量与海水的质量相似，那么地壳中的含水量也是 1.4×10^{24} g，占地壳总质量的 6% 左右。有人认为这可能太多了，但大多数人估计地壳中含流体的量占地壳总质量的 3%~6%，如果占 3%，地壳中的含水量则为 6.9×10^{23} g。至于地幔中流体的含量，有人认为约占地幔总质量的 0.03%，即为 1.2×10^{24} g，与地壳中的含水总质量相当（地幔总质量为 4×10^{27} g）。由此可知，海水与地壳中、地幔中流体的质量十分相近，似可表明其间的相互平衡和循环关系。实际上现代板块构造的研究告诉我们当板块俯冲时，把地下水带到了地下数千米，甚至数万米的地方，这些水（至少其中一部分）又通过循环回到了地表，其中一部分可能在地下深处被固定在含水的矿物中，如滑石、金云母、角闪石以及其他物相中。综上所述，地壳中存在着相当于地壳总质量的 3%~6% 的流体，海水（水圈）、地壳和地幔中的流体处于相对平衡状态，并且又是相互循环的。

二、地壳中流体的分类

地壳中的流体可按其化学成分及产状和成因来分类。

按化学成分分为：岩浆与硅酸盐熔融体； H_2O ； $H_2O - NaCl$ ，这里以 $NaCl$ 代表溶于水中的所有盐类； $H_2O - NaCl - CO_2$ ；有机流体，如石油和天然气等。

按产状和成因分为：岩浆热液；变质流体；海水；热卤水（包括地热水和地层水）；地下水（大气降水）；石油和天然气；岩浆；地幔流体等。

下面简要介绍地壳中存在的几种主要流体，尤其是与油气田有关的流体。

1. 海水

海洋是地球上最大的水库，同时也是一个最大的缓冲库。地球上每时每刻都在进行的风化作用把大陆的物质带进海洋，而在海洋中又在进行着机械和化学沉积作用。海水中的物质可能

有 8 种来源, 其中最大的来源是河水。据计算, 每年从河流搬运到海洋中的水量有 $3 \times 10^9 \text{ g}$, 而这些河水又携带 $4 \times 10^{15} \text{ g}$ 已溶于河水的物质和悬浮的沉积物进入海洋, 总起来说每年从河流带入海洋中除水以外的物质总量为 $2.2 \times 10^{16} \text{ g}$ 。

海水中阳离子按其浓度或含量的次序为 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ , 阴离子按其浓度或含量的次序为 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Br^- , 而最丰富的是 Na^+ 和 Cl^- , 这两者含量占海水中除 H_2O 外所有元素总量的 85% 以上, 因此把海水视为 $\text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$ 体系是十分恰当的。

现代大洋水的 H 和 O 同位素组成相对来说是十分均匀的, 其 $\delta\text{D} = +5\text{‰} \sim -7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = +0.5\text{‰} \sim -1.0\text{‰}$, 其平均值近似为: $\delta\text{D} = 0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 0.0\text{‰}$ 。把 $\delta\text{D} = 0\text{‰}$ 和 $\delta^{18}\text{O} = 0.0\text{‰}$ 定义为大洋水的标准值, 叫做 SMOW, 这个值只在特殊的情况下才有大的变化, 例如, 当高纬度冰川地带大量的冰融化流入海洋时, 使海水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数值降低; 像红海这样的与大洋连通的有限的海, 由于蒸发作用而使 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值升高; 而有的半封闭的海, 如黑海、波罗的海的水, 由于大气降水的流入而使 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低。

2. 大气降水和地下水

大气降水主要指雨和雪, 即与大气圈呈平衡的水, 而地下水指的是存在于地壳浅部的淡水和含盐的水。

大气降水的成分与河水和湖水的成分相似, 但大气降水中溶解的总物质 (TDS) 总量比河水和湖水中的要小得多。大气降水在降落时溶解了大气中的 CO_2 、 O_2 、 N_2 和其他气体。由于 CO_2 溶于水, 在水中可形成 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- , 有时也含有微量的钠和氯, 其 pH 值一般为 $5 \sim 5.5$, Eh 为 $+0.4 \sim +0.5 \text{ mV}$ 。

地下水主要分布于地壳的浅部, 其成分则以其 TDS 值比大气降水高为特征。

各种地下水其中所溶的物质 (TDS) 的总量分别为: 淡水为 $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 含盐的水为 $1\,000 \sim 10\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 盐水为 $10\,000 \sim 100\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 卤水为 $\geq 100\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

现代大气降水中的氢和氧同位素组成呈系统的变化:

$$\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$$

大部分大气降水如果不蒸发的话, 则其同位素组成值落在大气降水线上 (MWL) 或附近, 偏差不超过 1‰ 。对于局部地区来说这是有变化的, 这种变化取决于空气的湿度、温度、纬度和高度、离海岸的距离以及大气降雨量。当然地区性的气候和地表地理特征也会对大气降水的同位素组成产生影响, 尤其是大陆内的山脉对其影响很大。年平均大气降水的同位素组成与平均年温、地区的纬度和高度有关。

大气降水进入岩石中变成地下水后, 它的同位素组成几乎是不变的。

3. 孔隙水或地层水

孔隙水是指保留在地层的岩石孔隙或蓄水层中的水。过去有一个术语叫同生水, 指与地层同时存在的水, 即在沉积物深埋、压实过程中封存于地层中的水, 换句话说就是古海水。现在所指的孔隙水或地层水是指包括古海水在内的其他来源的水 (如大气降水、矿物结晶水, 以及从基底上来的流体的综合) 以及这种流体与岩石相互作用的总和。这种水实际上是一种卤水 (或热卤水)。

表 1-1 孔隙水的成分 (10^{-6}) (卢焕章, 1997)

项 目	密西西比中部卤水	南路易斯安那卤水	海 水
TDS	230 000	235 700	35 200
Na	54 200	78 000	10 760
Li		16	0.170
K	485	1 065	399
Rb		3.4	0.12
Cs		11.8	0.000 3
Mg	770	1 140	1 294
Ca	27 600	10 250	412
Sr	962	920	8.1
Ba	24	185	0.01
Fe	181	84	0.002
Cl	143 600	143 000	19 350
F		0.8	1.3
Br	1 090	419	67
I		18	0.064
B		44	4.5
NH ₃		100	2.0
H ₂ S		0.4	
HCO ₃		450	45
SO ₄ ²⁻	248	0.4	2 712
SiO ₂	42	48	6.2
Pb	28		0.000 03
Zn	143		0.002
pH		6.2	8.2

从表 1-1 可知:

(1) 地层水中溶解物质的总和 (TDS) 较海水高出一个数量级, 这是由于水岩相互作用的原因。

(2) 地层水中的大多数元素及组分均比海水中的高, 有的甚至高出几个数量级, 只有 SO₄²⁻ 在海水中的含量要比地层水中高出一个或几个数量级。

(3) 地层水中存在许多矿元素, 如铅、锌、铁、钡, 且其含量均比在海水高出几个数量级 (图 1-1)。

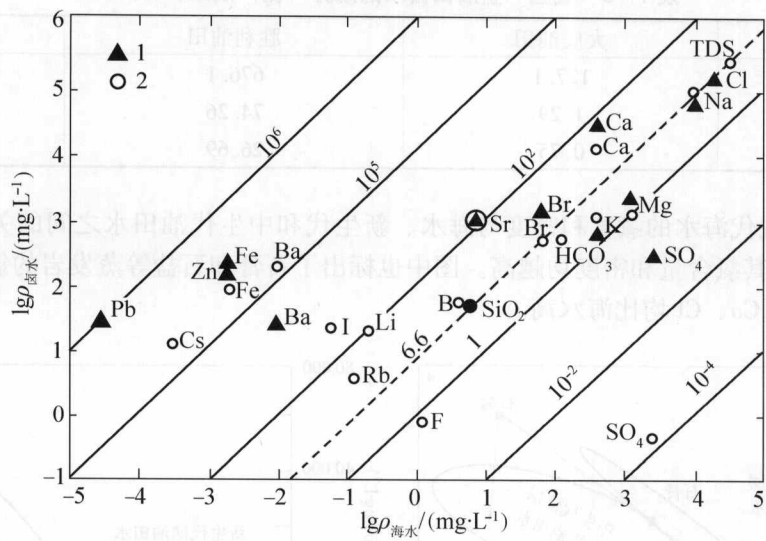


图 1-1 孔隙水和海水元素含量对比

1. 密西西比中部卤水; 2. 南路易斯安那卤水

(4) 地层水的另一个重要成员是油田卤水（表 1-2 和表 1-3），绝大部分油田水的 TDS 均超过海水，并且 SO_4^{2-} 明显地降低了 1~2 个数量级。

表 1-2 有代表性的油田水分析结果（卢焕章，1997）

油 田	蓄水岩石, 时代	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	总计
海水/ 10^{-6}		19 350	2 690	150		11 000	420	1 300	34 910
海水/%		55.3	7.7	0.2		31.7	1.2	3.8	
委内瑞拉 Lagunillas	610~915 m	89		120	5 263	2 003	10	63	7 548
得克萨斯 Couroue	Couroe 砂岩, 始新世	47 100	42	288		27 620	1 865	553	77 468
东得克萨斯	Woodbine 砂 岩, 晚白垩世	40 598	259	387		24 653	1 432	335	68 964
科威特 Burgan	砂岩, 白垩纪	95 275	198	—	360	46 191	10 158	2 206	154 388
得克萨斯 Rodessa	Oolitic 灰岩, 早白垩世	140 063	284	—	73	61 538	20 917	2 874	225 749
俄克拉荷马 Davenport	砂岩, 宾夕法 尼亚纪	119 855	132	—	122	62 724	9 977	1 926	194 736
宾夕法尼亚 Bradford	Bradford 砂岩, 泥盆纪	77 340	730	—	—	32 600	13 260	1 940	125 870
俄克拉荷马市	Simpson 砂岩	184 387	268	—	18	91 603	18 753	3 468	298 497
俄克拉荷马 Garber	Arbuckle 灰岩, 奥陶纪	139 496	352	—	43	60 733	21 453	2 791	224 868

表 1-3 我国一些油田卤水的成分 (据卢焕章, 1997) (g · L⁻¹)

元素	大庆油田	胜利油田	大港油田
Na	127.1	676.1	130.0
Ca	1.29	74.26	1.5
Mg	0.75	26.69	0.95

图 1-2 为现代海水的氯度和密度与海水、新生代和中生代油田水之间的关系, 表明油田水的时代越老, 其氯含量和密度均越高。图中也标出了石膏和石盐等蒸发岩的氯度和密度。所有油田水的 Na、Ca、Cl 均比海水高。

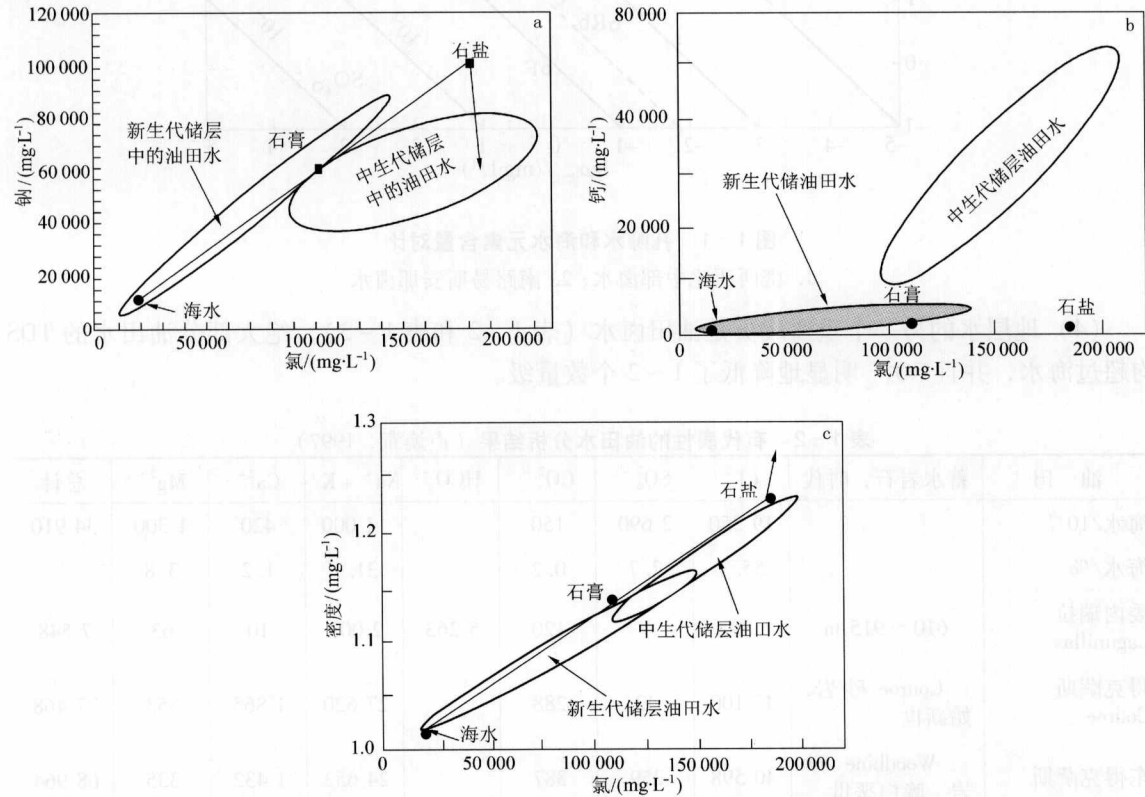


图 1-2 现代海水氯化物和密度与新生代和中生代油田水之间的关系 (Macpherson, 1992)

图 1-2 示油田水的成分和油田卤水与密度的关系。图 1-2a 示油田卤水的氯化物含量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 与钠的含量的关系。当然也可以是钾、钙、镁等元素与氯化物之关系。图中标出海水的组成, 石膏和石盐开始沉淀的点 (值)。说明油田卤水的 NaCl 含量大于海水。图中的阴影区示美国海湾沿海地区 (Gulf coast) 新生代和中生代的油田卤水的成分范围。说明中生代的卤水中 NaCl 的含量比新生代油田卤水的含量高, 这可能是水岩相互作用的缘故。图 1-2b 示油田卤水中钙和氯化物含量的关系。在新生代的油田水中随着氯化物含量的增加, 其钙的含量增加不多, 而在中生代的油田水中其钙的含量与氯度成正比。图 1-2c 示油田卤水的密度与氯化物含量的关系, 从图中可知它们是呈正比的。不管是新生代还是中生代的油田水, 弄清油田水的成分对于在油田水中捕获的流体包裹体的成分有十分重要的意义