

## 内容提要

本书着重介绍沉积盆地分析的基本理论、基本知识和基本研究方法,以及在能源资源预测及勘查中的应用。全书共分 10 章,内容包括沉积盆地的研究现状与基本概念、盆地形成机制和基本动力学类型、层序地层分析、沉积体系分析、盆地的热历史与有机质转化、盆地流体系统与油气运移、盆地形成演化与板块构造和深部过程、盆地模拟、盆地分析的主要技术方法和编图、盆地分析在能源资源勘查中的应用。

本书的特点是偏重于基础并力求反映国内外本领域的新进展,是在作者们长期从事本领域教学及科研基础上编著的。适用于能源地质、基础地质以及从事矿产普查勘探的研究生及高年级大学生阅读和学习。同时也适合于这些领域的教学和科研人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

沉积盆地分析基础与应用 /李思田等编著. —北京:高等教育出版社,2004.9  
ISBN 7 - 04 - 015490 - 0

.沉... .李... .构造盆地 -研究生 -教材  
.P941.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 086494 号

策划编辑 徐丽萍 责任编辑 田 军 封面设计 李卫青 责任绘图 郝 林  
版式设计 王 莹 责任校对 王 超 责任印制

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010 - 82028899		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>

经 销 新华书店北京发行所  
印 刷

开 本	787 × 960 1/16	版 次	年 月第 1 版
印 张	26.25	印 次	年 月第 次印刷
字 数	490 000	定 价	40.50 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号:15490 - 00

# 目 录

前言 .....	
第一章 研究现状与基本概念体系 .....	1
第一节 盆地分析的发展与研究现状简述 .....	1
第二节 盆地分析的若干基本概念 .....	3
第三节 研究思路与流程 .....	9
第二章 盆地形成机制和基本动力学类型 .....	13
第一节 盆地沉降作用和动力学类型 .....	13
第二节 伸展型盆地 .....	16
第三节 挠曲类盆地 .....	41
第四节 走滑带盆地 .....	50
第五节 沉积盆地演化的若干重要特征 .....	58
第三章 层序地层分析 .....	68
第一节 层序地层分析基本原理 .....	68
第二节 层序构成样式 .....	87
第三节 层序形成的控制因素及其综合效应 .....	103
第四章 沉积体系分析 .....	111
第一节 冲积扇和河流沉积体系 .....	112
第二节 三角洲沉积体系 .....	132
第三节 碎屑滨岸沉积体系 .....	158
第四节 陆源陆架、陆坡和盆地沉积体系 .....	167
第五节 碳酸盐岩沉积体系 .....	179
第六节 储层结构与砂体非均质性 .....	182
第五章 盆地的热历史与有机质转化 .....	200
第一节 盆地热历史研究方法 .....	200
第二节 煤化作用 .....	210
第三节 有机质转化与油气生成 .....	221

---

第六章 盆地流体系统与油气运移 .....	227
第一节 盆地流体的成分与性质 .....	227
第二节 盆地流体的流动样式与驱动因素 .....	233
第三节 盆地流体输导系统与油气运移 .....	239
第七章 盆地形成演化与板块构造和深部过程 .....	254
第一节 沉积盆地演化与板块构造格架和地幔深部过程的关系 .....	254
第二节 中国沉积盆地的基本特征及形成的动力背景 .....	266
第八章 盆地模拟概述 .....	275
第一节 盆地沉降史、热史和有机质转化史模拟 .....	275
第二节 盆地流体模拟 .....	294
第三节 盆地模拟现状与发展趋势 .....	302
第九章 盆地分析的主要技术方法和编图 .....	306
第一节 盆地分析中的多学科技术 .....	306
第二节 盆地研究中的地球物理方法 .....	315
第三节 盆地分析的编图系列 .....	328
第十章 盆地分析在能源资源勘查中的应用 .....	355
第一节 盆地分析与油气资源研究 .....	355
第二节 盆地分析与煤资源研究 .....	361
第三节 沉积盆地分析与核资源研究 .....	374
参考文献 .....	390

# 前 言

沉积盆地是大自然提供给人类能源和矿产资源的最重要宝库。石油地质家早就认识到石油、天然气形成并赋存于沉积盆地之中。没有盆地就没有石油 - “No Basin, No Oil”, 法国石油地质学家 Perrodon A (1983) 的这一简单名言说明了盆地对能源的重要性。20 世纪的后 20 年, 从事金属矿床研究和勘查的地质家们通过对许多矿床成矿作用的精细研究, 发现并证明了富含有机物的盆地流体在成矿流体中居重要地位, 认识到盆地对层控矿床形成的重要性。涂光炽先生曾指出沉积盆地是形成超大型层控矿床的必要条件。近十余年来, 放射性矿产的勘探也将重点转向含油、气及含煤盆地中的砂岩型铀矿。

盆地又是人类所需淡水资源的最重要储库。随着经济的高速发展, 现在人们日益认识到水资源对人类生存和发展的极端重要性。实践证明, 要想保护和合理利用水资源, 就必须认识整个盆地中水的赋存状态及其循环系统。

“沉积盆地分析”这一学科是地质学家在多年研究沉积盆地及相关资源过程中形成的理论和方法体系。盆地分析学科的早期发展侧重于盆地充填的沉积学研究, 并被归属于宏观沉积学或沉积地质学的范畴。以后逐渐汲取了构造、大地构造、地球物理、地球化学和计算机技术等许多学科的成就并用以研究沉积盆地的成因、演化和其中资源的聚集规律。在当代盆地分析的理论与方法中鲜明地体现了多学科聚焦的特色。

人类社会对能源资源的需求是推动这一学科发展最主要的驱动力。当代能源供给的严峻形势, 特别是由于油气勘探的高难度及其在国民经济中的战略地位, 吸引了许多学科在盆地领域进行研究, 并采用了许多先进的技术及方法, 使当代盆地分析具有多学科的综合性和技术方法的先进性。因此沉积盆地分析的教科书需要概要地反映这些新进展, 包括基于先进的地球动力学理论对盆地形成、演化的认识, 盆地的过程模拟技术以及盆地的流体系统等许多新领域。

本书由中国地质大学沉积盆地及沉积矿产研究所的成员集体编写, 其中第一、七章和第十章第一节由李思田执笔, 第二章由任建业执笔, 第三章和第四章及第十章第三节由焦养泉执笔, 第五章、第十章第二节由庄新国执笔, 第六、八章由解习农执笔, 第九章第二节由胡祥云执笔, 陆永潮执笔第三章和第九章部分内容。屈友华负责全书的排版工作及部分图件清绘工作。

本书作为高校研究生教材和本科生选修课参考书, 在内容安排上侧重于基本理论、概念及基本方法介绍, 并偏重于含油气盆地领域。许多较为专门的部分

---

则需要读者参考更多的相关文献以作深入的了解。为此本书介绍了一些盆地分析的主要参考文献,特别是较经典性的著作目录望读者选择参阅。盆地分析是一门实践性很强的学科,这就需要在掌握基本概念和方法的基础上,熟悉地球物理特别是地震和测井资料的解释,并能应用地球化学参数及从事计算机模拟等,只有这样才能胜任盆地分析的实际工作,这是对年轻读者的衷心建议。

## 第六章 盆地流体系统与油气运移

沉积盆地包括沉积骨架和孔隙流体两部分,长期以来,人们普遍侧重于沉积骨架岩石研究,而对岩石骨架孔隙中的流体研究较少。近十多年来,随着盆地动力学分析的深入,盆地流体研究受到了广泛关注,并成为当今国际地学界的热点问题。

“地质流体”(geofluid)一词首次在1993年国际流体会议上被正式使用,它包括了通过地下岩石流动的所有流体。对于沉积盆地而言,“地质流体”被认为是任何占据沉积物孔隙、裂隙和在其中流动的流体。显然,在沉积盆地形成和演化的复杂过程中,盆地流体运动也经历了一个复杂的过程。因此,盆地流体研究不仅构成盆地动力学分析的重要组成部分,而且盆地流体的流动与成矿、油气成藏密切相关(Bethke等,1991;Eadington等,1991;查明,1997;焦大庆等,1998;解习农等,2000)。

### 第一节 盆地流体的成分与性质

盆地流体,也就是广义的“地层水”,是指任何占据沉积物孔隙裂隙和在其中流动的流体,包括盆地内产生和流动的内部流体和产生于外部而流入盆地的外部流体。内部流体包括沉积水、成岩水、烃类。沉积水系指沉积物堆积过程中保存于岩石孔隙或裂隙中的水,成岩水系指沉积物在成岩作用和烃类生成过程中,由于物理化学作用所产生的水,如黏土矿物转化(蒙脱石向伊利石转化)脱出的层间水,有机质向烃类转化分解出的水。外部流体包括由大气降雨时渗入到地下岩层中的渗入水和从岩浆中游离出来的初生水和变质作用过程中所形成的变质流体。

#### 一、盆地流体成分

盆地流体是一种溶液,溶液中有各种不同的离子、分子、化合物以及不同的气体。到目前为止,在盆地流体中已发现六十多种不同元素。这些元素含量取决于赋存方式及其溶解度。各种物质在水中的溶解度,除取决于它们本身的物理化学性质外,还与水温有关。大多数盐类的溶解度随温度增高而加大,而气体的溶解度则恰相反,它随着温度升高而减小。此外,某些物质的溶解度还与其他

物质在水中的浓度有关。例如,当水中含有  $\text{CO}_2$  气体时,水对碳酸盐的溶解能力可增加三倍。在油田水中由于有机酸的存在,流体对某些金属元素(如:金)具有萃取和富集作用。

### (一) 主要无机组成

盆地流体中溶解成分通常以下列几种形式存在,即离子状态、化合物分子状态以及游离气体状态。离子成分中常见阳离子有: $\text{H}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 等;常见阴离子有: $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{OH}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_3^{2-}$ 及 $\text{PO}_4^{3-}$ 等。以未离解的化合物状态存在的有: $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{H}_2\text{SiO}_3$ 等。气体成分有 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 以及氦等。

在盆地流体中分布最广的离子有七种,即 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 。地表河水和海水与盆地流体中离子浓度差异较大(表 6-1)。

表 6-1 各种水中化学成分(g/L)(据 Hunt,1995)

离子	河水	海水	泥中孔隙水 <sup>a</sup>		油田水 <sup>b</sup>	
			9.5 m	335 m	1 570 m	1 814 m
$\text{Na}^+$	0.006	10.8	10.5	7.8	53.9	57.0
$\text{K}^+$	0.002	0.4	0.4	0.3	-	-
$\text{Ca}^{2+}$	0.004	1.3	1.3	0.4	2.1	2.2
$\text{Mg}^{2+}$	0.015	0.4	0.4	2.7	15.0	18.0
$\text{Cl}^-$	0.008	19.4	19.6	23.4	115.9	126.0
$\text{SO}_4^{2-}$	0.011	2.7	2.8	2.8	0.1	0.07
$\text{HCO}_3^-$	0.059	1.4	0.1	0.05	0.05	0.06
合计	0.105	36.4	35.1	37.4	187	203

a:孔隙水数据取于菲律宾东 292号孔深海钻探中钙质泥样(据 White,1975);

b:样品取于得克萨斯和俄克拉何马 Tonkawa和 Morrow组宾夕法尼亚砂(据 Dickey和 Soto,1974),其中钾离子没有分析

### 1. 主要阳离子

钠是碱金属元素中丰度最高的一个。 $\text{Na}^+$ 在盆地流体中广泛存在,它不易与阴离子结合而沉淀出来,与铯、铷、钾、锂、钡和镁相比,钠不易被黏土矿物所吸附(Collins,1975)。盆地流体中的 $\text{Na}^+$ 主要来源为岩盐矿床沉积。在海相沉积区, $\text{Na}^+$ 来自于海水。此外,火成岩与变质岩中某些矿物如钠长石的风化也能产生 $\text{Na}^+$ (李正根,1980)。

$\text{K}^+$ 在盆地流体中含量远低于 $\text{Na}^+$ ,其含量一般小于1 g/L。 $\text{K}^+$ 的来源与

$\text{Na}^+$  相同。钾盐的溶解度也很大。但是  $\text{K}^+$  在盆地流体中含量不高。这是因为  $\text{K}^+$  易被黏土矿物或胶体所吸附,又易被植物吸收。

$\text{Ca}^{2+}$  在盆地流体中分布很广,但含量不高。盆地流体中  $\text{Ca}^{2+}$  主要来源于碳酸盐岩石以及含石膏岩石的溶解。海水中碳酸钙的溶解度,随含盐度和二氧化碳分压的增高而增加;但随 pH 值和温度的增高而降低。硫酸钙的溶解度也随温度的升高而降低。

$\text{Mg}^{2+}$  在盆地流体中分布也较广,但含量不高。其主要来源于海水,或者白云岩以及基性岩石中某些矿物如辉石与橄榄石类矿物的风化。

## 2. 主要阴离子

$\text{Cl}^-$  是盆地流体中分布最广、含量最高的阴离子,但含量的变化范围很大,每升水中由数毫克至数百克不等。 $\text{Cl}^-$  主要来源于海水、岩盐矿床或其他含氯化物。此外, $\text{Cl}^-$  还可能为有机来源,即来自于动物及人类的排泄物。

$\text{SO}_4^{2-}$  含量仅次于  $\text{Cl}^-$ 。在每升地层水中  $\text{SO}_4^{2-}$  的含量变化范围由十分之几毫克至数克不等。 $\text{SO}_4^{2-}$  主要来源于石膏及其他含硫酸盐的沉积物。其次,也有来自天然硫及硫化矿物的氧化产物。在油田水中常发现硫化氢,是厌氧细菌形成的。它从硫酸根离子中获得氧,使硫酸还原而形成硫化氢。

$\text{HCO}_3^-$  也广泛分布于盆地流体之中,但其含量相对较低。 $\text{HCO}_3^-$  主要来源于碳酸盐岩石,如石灰岩、白云岩与泥灰岩等的溶解。

此外,在有些盆地流体中还存在  $\text{CO}_3^{2-}$ ,它主要来源于碳酸盐岩石的溶解。

## (二) 微量元素

盆地流体中含有几十种微量元素,常见的有碘 (I)、溴 (Br)、硼 (B)、钡 (Ba)、锶 (Sr)、氟 (F)、铁 (Fe)、锂 (Li)、铝 (Al)、铜 (Cu)、银 (Ag)、锡 (Sn)、钒 (V) 和硒 (Se) 等。其中有些微量元素组合特征、异常值或比值能较好地反应地层水的起源、沉积环境、水的浓缩程度及水文地质的封闭性 (陈荣书, 1994)。比如,氟化钙和高 Br 值能指示封闭的沉积环境,硼 (B) 的富集与水文地质的封闭性有关, Ba 和 Sr 的含量和比值也可反映油田水来源于大陆淡水还是海水。

## (三) 有机组成

在含有机质沉积物的沉积盆地中,地层水通常含有许多可溶的有机组分。一般而言,盆地流体中有机组成含量及成分差异较大,与油气田伴生的地层水中常见的有机成分有有机酸、烷烃、苯和酚。这些组分含量变化常可作为油气寻找的重要的水化学标志。

油田水中常含数量不等的环烷酸、脂肪酸和氨基酸等。松辽盆地北部葡萄花、扶余和杨大城子油层水中脂肪酸含量最高可达 2 060 mg/L (黄福堂, 1999)。

油层水的烃类有气态烃 ( $\text{C}_1$  烃类) 和液态烃。而非油层水中常只含少量

甲烷。重烃含量可用甲烷系数 ( $\text{CH}_4$  总烃) 或干燥系数 ( $\text{CH}_4/\text{C}_2^+$  烃) 表示之。

油层水中苯系化合物含量高, 一般可达  $0.01 \sim 1.58 \text{ mg/L}$ , 最多可达  $5 \sim 6 \text{ mg/L}$ , 且甲苯/苯大于 1; 非油层水中苯系化合物含量低, 且甲苯/苯小于 1。

酚在油层水含量较高, 一般大于  $0.1 \text{ mg/L}$ , 最高达  $10 \sim 15 \text{ mg/L}$ , 且以邻甲酚和甲酚为主; 非油层水中的含量低, 且以苯酚为主 (陈荣书, 1994)。

## 二、盆地流体性质

由于盆地流体的化学成分复杂, 其物理和化学性质具有明显差异。了解盆地流体的性质, 对盆地流体的成因和演化是十分重要的。

### (一) 物理性质

#### 1. 颜色

盆地流体的颜色取决于地层水中溶解物、胶质、有机烃类、矿物质。含有硫化氢的地层水, 由于氧化时分解出游离硫磺胶体, 故常呈翠绿色。含氧化亚铁的水呈浅蓝绿色, 含氧化铁的水呈褐红色。

#### 2. 密度

流体密度是每单位体积内流体的质量, 单位为  $\text{g/cm}^3$ 。由于盆地流体中含有大量溶解物及矿物质, 其密度比纯水 ( $1.0 \text{ g/cm}^3$ ) 大。一般而言, 地层水密度随着矿化度增大而增大 (图 6-1)。如果已知地层水矿化度, 那么地层水密度可通过用下式求得 ( $w$ ) (Collins, 1987)。

$$w = 1 + \text{TDS} \times 0.695 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3 \quad (6.1)$$

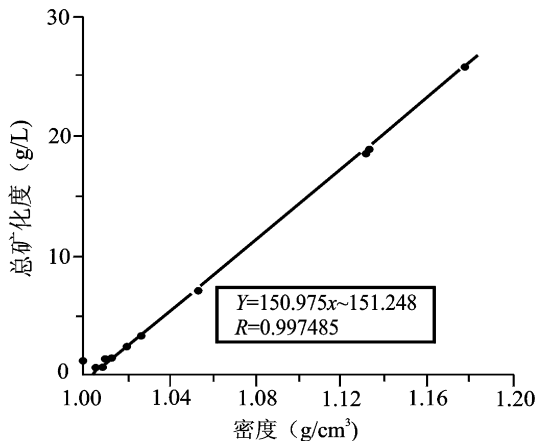


图 6-1 松辽盆地地层水总矿化度与密度的关系

(据黄福堂, 1999)

### 3. 黏度

黏度代表流体流动时分子之间对运动所引起的内摩擦力的大小。黏度愈大则流动性愈差,反之,则流动性好。流体的黏度随温度的降低和含盐度的增加而增加。

### 4. 导电性

盆地流体因其矿化度较高,所以且有良好的导电性,如松辽盆地北部地层水的导电率为  $1.30 \times 10^3 \sim 6.76 \times 10^4$  s/m,最大值达  $8.30 \times 10^4$  s/m。一般而言,地层水的总矿化度越高,电导率也越大(图 6-2)。

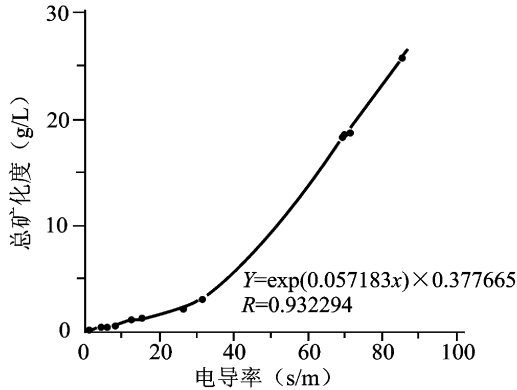


图 6-2 松辽盆地地层水总矿化度与电导率的关系

(据黄福堂,1999)

## (二) 化学性质

### 1. 矿化度

矿化度是指水中所含各种离子、分子及化合物的总量,或称为水的总矿化量(TDS),以 g/L 表示。其中包括所有溶解状态及胶体状态的成分,但不包括游离状态的气体成分。

按照矿化度大小,可将地层水划分为以下几类:

淡水	矿化度	< 1g/L
微咸水	矿化度	1 ~ 3g/L
咸水	矿化度	3 ~ 10g/L
盐水	矿化度	10 ~ 50g/L
卤水	矿化度	> 50g/L

### 2. 水型

地层水的分类方法通常依赖于水中所发现的溶解组分及其化学性质。在含油气盆地的地层水分类中多数采用苏林分类法(Sulin,1946)。他根据水中溶解

盐类的不同组合提出了一种分类方案(表 6 - 2)。水的组分以毫克当量数来表示,为了排除水的矿化大小对水型的影响,采用当量总和的百分数用来比较水中所含有的不同溶解固体的重量。根据三组特征系数的变化,即  $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ 、 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-) / \text{SO}_4^{2-}$ 、 $(\text{Cl}^- - \text{Na}^+) / \text{Mg}^{2+}$ ,将地层水划分为四类水型。

表 6 - 2 苏林的原生水型分类

水型	$\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$	$(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-) / \text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Cl}^- - \text{Na}^+) / \text{Mg}^{2+}$
硫酸钠型	> 1	< 1	< 0
重碳酸钠型	> 1	> 1	< 0
氯化镁型	< 1	< 0	< 1
氯化钙型	< 1	< 0	> 1

- (1) 硫酸钠型水 :代表大陆近地表环境的地层水 ;
- (2) 重碳酸钠型水 :代表大陆条件的地层水 ;
- (3) 氯化镁型水 :代表海洋环境或连续蒸发条件下的地层水 ;
- (4) 氯化钙型水 :代表深层停滞状态下的地层水。

### 3. 酸碱度 (pH)

pH值是氢离子浓度的反对数(以 10为底)。纯水在 25℃ 时的 pH值为 7.0,其含意是每升溶液中  $\text{H}^+$  为  $10^{-7}$ 克分子。当其他组分被水溶解时,由于新的离子与  $\text{H}^+$  或  $\text{OH}^-$  相结合,导致 pH值的变化。

当  $[\text{H}^+]$  为  $10^{-7}$ 时,pH等于 7,说明水为中性。当  $[\text{H}^+]$  大于  $10^{-7}$ 时,则 pH小于 7,呈酸性,反之则呈碱性。根据 pH值,可将地层水的酸碱度分为强酸性、弱酸性、中性、弱碱性及强碱性五个等级(表 6 - 3)。

表 6 - 3 水的酸碱度

酸碱度	pH
强酸性	< 5
弱酸性	5 ~ 7
中 性	7
弱碱性	7 ~ 9
强碱性	> 9

## 第二节 盆地流体的流动样式与驱动因素

### 一、流体流动的驱动因素

盆地流体流动的关键问题是动力和通道。一般而言,孔隙水在沉积盆地中的流动是由两种因素所致,一是压力驱动,形成压力流;二是热驱动,形成热对流。盆地流体的流动受控于盆地形成和演化,即受构造、沉积、地层压力和热演化等多方面因素的控制。

#### (一) 压力驱动——压力流

盆地流体流动的基本原则是降低其能量,流体总是从高势区向低势区流动。盆地内孔隙水在压力驱动下形成压力流。压力流是指发生在高压与低压之间即沿压力梯度的流体流动。最重要的驱动力包括:沉积压实、浮力、重力和构造应力及地震(图 6-3)。流动被看成是水力梯度的反映。

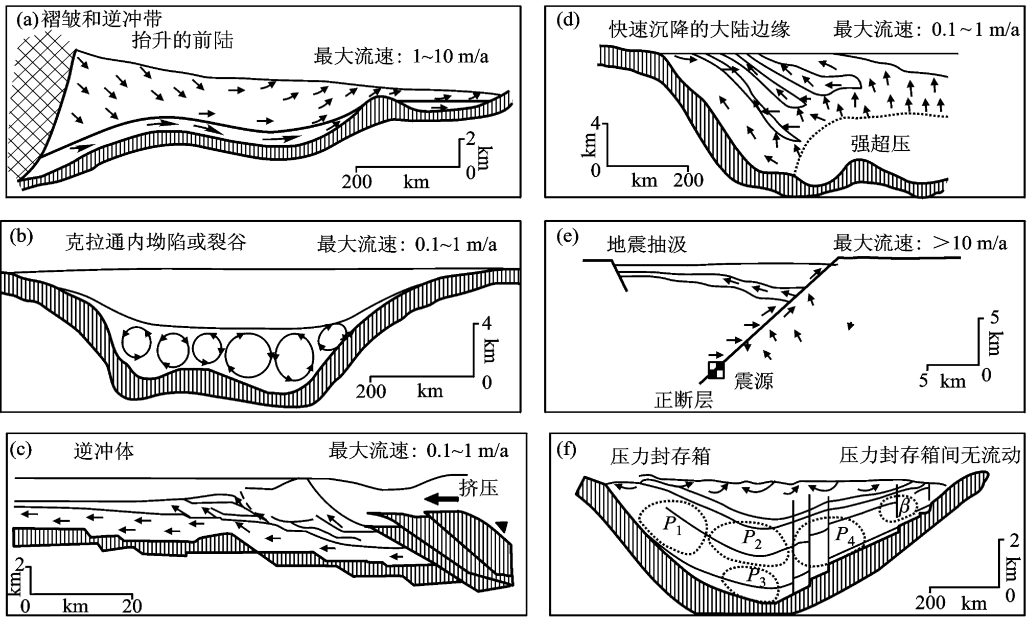


图 6-3 盆地构造体制及其流体流动样式

(据 Garven, 1995)

#### 1. 沉积压实

随着沉积物不断埋深,由于受上覆沉积物的重力作用而发生压实作用,沉积物孔隙空间减少,孔隙空间的流体被挤出,进而导致盆地内流体的流动。在细粒

沉积物中,由于沉积物快速沉积使得孔隙空间中的水不能有效排出,逐渐形成超压带。反之,超压带的形成暗示了流体流动障碍的存在。Bethke等(1991)对Illinois盆地模拟研究指出:沉积速率为 $30\text{ m/Ma}$ 时,压实驱动的流动速率小于 $2\text{ km/Ma}$ 。根据体积和速率判断,即使在快速沉降的盆地中压实作用驱动流体流动也是微弱的。

## 2. 浮力

沉积盆地中浮力主要由受温度和盐度控制的流体密度梯度产生,而温度和盐度常常随深度而增加。流体密度随温度的增加而减少,England等(1997, 1993)认为非对流性浮力驱动流动是埋深 $3\text{ km}$ 以内的烃类的二次运移的重要机理。

## 3. 重力

由于重力和地形差产生的流动受控于降雨量、下渗水的百分含量、水压头及含水层的渗透性和连续性。进入盆地流体的流动在很大程度上受盆地地貌(也是成因)的控制,如低地势的克拉通盆地与具活跃的边缘抬升和含水层出露的前陆盆地之间有明显的差别。由重力和地形可导致盆地内流体沿盆地含水层进行较长范围内的流动,比如在前陆盆地可达数百公里的流动(Bethke, 1989; Deming等, 1992)。

## 4. 构造应力和地震

构造挤压应力对盆地流体流动的影响主要表现在两方面:一方面是通过骨架岩石的变形改变水文地质单元和流体输导网络的分布以及各输导体的输导能力;另一方面会改变地层压力系统,比如导致超压系统的形成或泄漏。

地震活动常常产生新的或使先存断裂再活动,从而导致流体的快速流动。Cox(1994)提出的“断裂阀模型”较好地解释了地震活动与断裂带中应力积累和释放的过程。地震活动不仅影响断裂发生、发展、封闭和断裂强度,而且影响到断裂带流体活动及附近矿床的形成。断裂带活动为流体循环、水岩相互作用提供了必要条件,流体的再分配是断裂带中应力积累和释放的响应。流体压力和剪切压力的耦合变化影响断裂带摩擦作用中剪切强度的变化,进而控制断裂的发生和停止。因此断裂带流体活动的幕式变化指示了断裂活动事件或地震活动旋回(解习农等, 1996)。

### (二) 热驱动——热对流

热对流是指由于温差所产生的热力而导致流体的流动。由于温度和含盐度的变化产生密度梯度而引起孔隙水的瑞利(Rayleigh)和非瑞利对流驱动。热对流一直被认为是穿过地下岩层溶质运移的机理之一(Wood和Hewett, 1982, 1984; Davis等, 1985)。

当流体流动方向与等温线相交时,侧向流体运动将导致热重新分布。热流

体活动导致岩石成熟度异常和物质的迁移,根据这些热异常和成岩反应,反过来追踪热流体活动的流径和判断热流体的活动范围。

### 1. 瑞利对流

瑞利对流需要非常厚的、均匀、多孔砂岩(109~300 m)的存在,其中不能存在任何低渗层的夹层,如黏土层(Björlykke等,1988)。瑞利对流的数学模型已表明,砂岩层序中的相对薄层页岩(0.1 m)或胶结层段,将会有效地把可能大的对流团分割成较小的对流圈,以致太小而不能超过临界瑞利值。因瑞利对流而引起的孔隙水流动非常之快,足以在10 Ma内溶解和沉淀10%的石英(Palm, 1990)。这表明,相对于成岩过程而言,如果发生瑞利对流,将对成岩产生积极、快速的影响,但这种情况可能相对罕见。

### 2. 非瑞利对流

在具有非水平等温线的倾斜地层中,流体总是不稳定的,这时非瑞利对流将会产生(Gouze等,1994)。非瑞利对流的速度与等温线的倾斜度以及对流圈高度成正比关系。若对流只局限在几米厚、有页岩分隔的砂岩层里,就成岩时期物质运移而言,热对流所产生的层内流体流动速度将会很小(Björlykke,1988)。

## 二、盆地流体流动循环样式

Coustau(1977)根据盆地的水动力特征,将盆地流体活动划分为“青年”、“中年”和“老年”三阶段,分别对应于压实驱动流、重力驱动流和滞流(无水流)三种水流循环样式(图6-4)。在盆地发育过程中,随着沉积物不断沉积,上覆沉积物厚度增大,由压实作用导致岩石孔隙中的流体被挤出,形成压实驱动流,使流体从盆地中心向盆地边缘或从深部向浅部流动。重力驱动流则是由地势高差引起的流体在重力作用下从高势区向低势区的流动。当盆地进入老年阶段,盆地四周被剥蚀夷平,盆地中岩石孔隙也不再发生变化,从而出现不存在任何流动的滞流现象。

然而,大量研究成果表明,盆地流体循环样式绝不是这样简单的样式。盆地流体系统可能是一个复杂的流体系统,包括多个互相关联而又各具特色的流体循环系统。盆地流体循环样式决定了盆地内流体区域流动的指向和趋势。它受盆地地球动力学背景、盆地构造、沉积充填、热史及水文体制的控制。在沉积盆地演化过程中,最常见的流体循环样式有压实和超压驱动型、重力和地形驱动型以及构造应力驱动型。大量研究成果表明,在不同盆地的不同演化阶段具有不同的盆地流体循环样式。

### (一) 压实和超压体系驱动样式

压实驱动流是指在上覆沉积物的作用下,由压实作用挤出流体。一般而言,盆地压实流是从盆地中心向盆地边缘或从深部向浅部的流动。Magara(1978)提

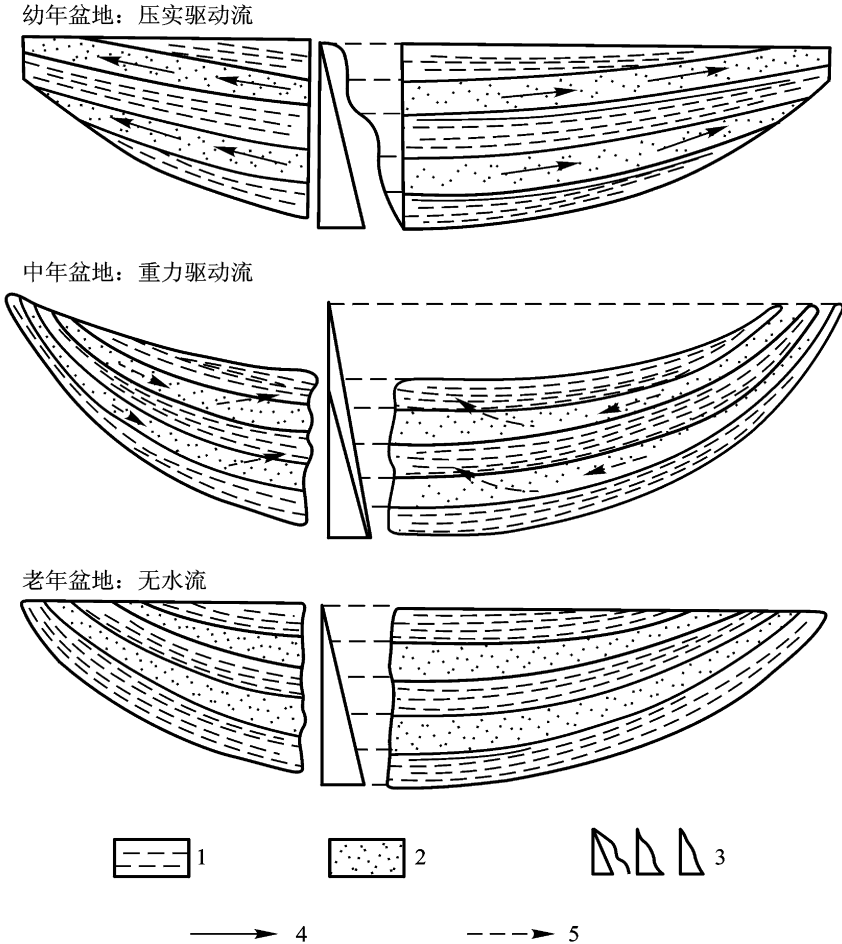


图 6 - 4 沉积盆地水动力演化阶段

(据 Cousta, 1977)

1. 黏土 ; 2. 砂岩 ; 3. 垂直孔隙压力剖面 ; 4. 压实驱动流 ; 5. 重力驱动流

出的压实盆地水流模型是盆地流体主要通过更好渗透层从盆地中心向边缘或从深部向浅层流动。在正在沉降盆地中,压实驱动的盆地流体流动系统大致可划分为三个亚系统 (Verweij, 1993): 浅部亚系统流体以垂向穿层流动为主; 中部亚系统流体在高渗层中以侧向流动为主, 而在细粒岩石中流体被向上或向下挤出, 一般没有穿过细粒岩石的穿层流体流动; 深部亚系统流体流动受到很大程度的局限, 流体流动十分缓慢, 以连续式或幕式方式流动, 特别是在超压系统内只有当封闭层出现断裂或裂隙时才能导致流体的快速幕式排出。在盐底辟背景条件下, 伴随盐底辟流体活动不仅导致地层压力再分配, 同时也导致地层水化学成分的变化 (图 6 - 5)。

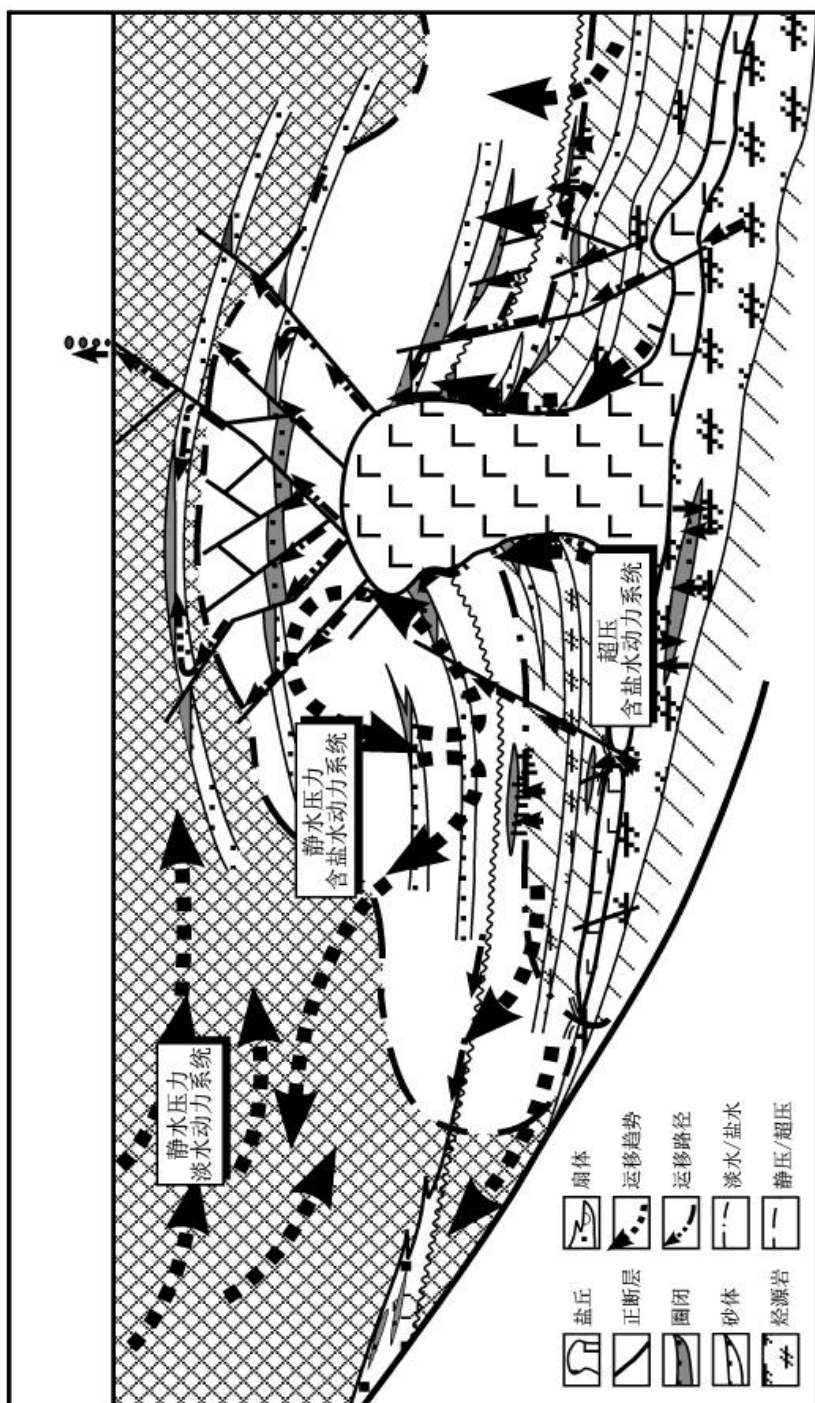


图 6-5 盐底辟构造 - 流体流动的成因模式图

### (二) 构造应力驱动样式

板块构造作用控制沉积盆地演化,同时也影响盆地内流体运动和演化。构造应力驱动的盆地流体流动常见于板块俯冲带或附近 (Verweij,1993),如前陆盆地。这些盆地受到垂向和侧向挤压应力的影响。首先,侧向应力的增加可加速前陆盆地沉降 (Allen and Allen,1990),影响沉积速率,进而有利于超压体系的形成。连续侧向构造挤压同时也能直接影响流体压力的大小和分布。此外,俯冲板块垂向负载的增加使逆冲推覆体之下盆地流体压力增加,导致盆地流体向远离俯冲带的方向流动 (图 6-6)。在逆冲推覆体之下盆地流体沿断裂或输导层的幕式活动可能与俯冲板块幕式活动有关 (Bradbury and Woodwell,1987; Roberts,1991)。

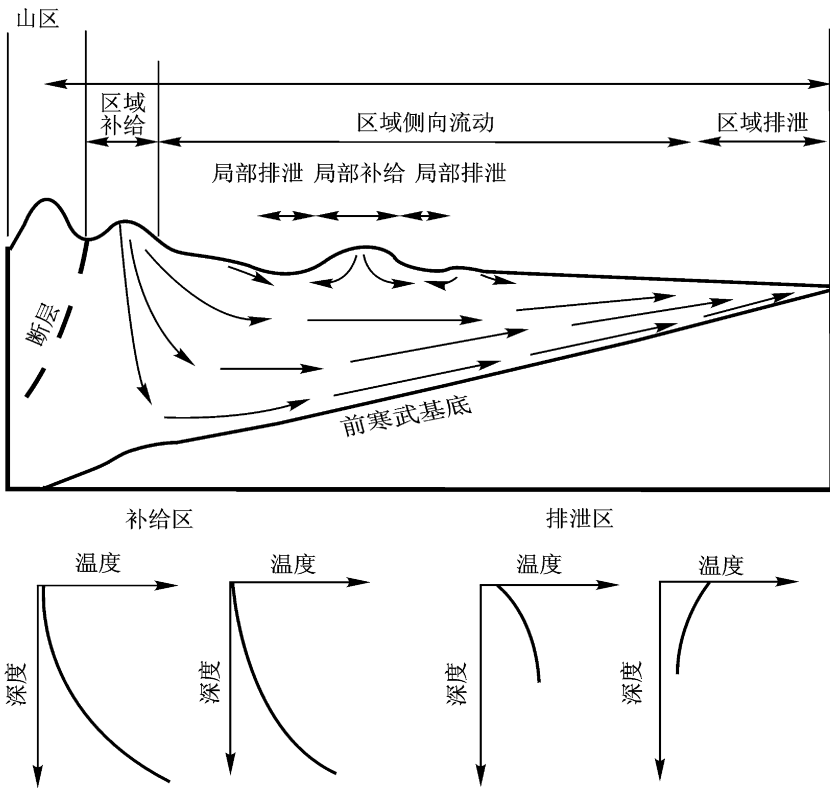


图 6-6 加拿大阿尔伯达盆地流体活动样式

(据 Majrowicz等,1985)

### (三) 重力和地形驱动样式

在构造稳定和无压实的成熟盆地,天水的下渗透重力驱动的流体循环样式控制了区域地下水流系统 (Toth,1962,1970)。这种样式主要受控于盆地及其周