

含油气盆地流体演化研究

焦大庆 梁志刚 王长青 任来义 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

流体历史分析是盆地分析研究的重要组成部分和石油勘探的有效手段之一。本书共编入了14篇有关盆地内流体研究的论文，主要从：(1) 流体的成因与成岩作用，(2) 流体流动的动力、通道和模式，(3) 流体流动的识别与烃类的运移、聚集三个方面，介绍了当前含油气盆地流体演化研究的思路、方法和成果。该书既涉及到流体研究中的一些理论问题又涉及石油勘探中的实际应用。因此，本书可供广大从事石油地质研究和石油勘探工作等人员参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

含油气盆地流体演化研究/焦大庆 等编著.

北京：石油工业出版社，1998 4

ISBN 7 - 5021 - 2187 - 0

- . 含...
- . 焦...
- . 含油气盆地 - 流体 - 进化 - 研究
- . P618 130 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 25835 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787 × 1092 毫米 16 开本 11 印张 285 千字 印 1—1200

1998 年 4 月北京第 1 版 1998 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7 - 5021 - 2187 - 0 / T E · 1832

定价：18.00 元

前 言

虽然地质学家早就认识到盆地内流体的流动，但由于受研究方法和技术条件的限制，沉积盆地内作为其重要组成部分的流体，长期未能得到与其在成盆、成矿过程中的重要地位相匹配的重视。80年代中、后期以来，沉积盆地内区域性的流体流动得到了广泛的鉴别和研究，尤其是1993年5月在英国举行的“93地流体”会议上首次提出了“地流体 (Geofluid)”一词，会后分别出版了特刊和专辑，全面介绍了世界范围内沉积盆地内流体成因、运移和演化研究的成果，从而使盆地流体研究进入了一个崭新的发展阶段。

石油、天然气藏的生、储异地是有别于其他矿体的重要特征之一。进入90年代，含油气盆地中流体历史分析 (FHA)，不仅是盆地分析和研究的重要内容而且也是石油勘探的有效手段之一，并得到了蓬勃发展。它不仅对追溯油气成藏过程、评价资源潜力和寻找有利勘探区块有现实指导意义，而且也有助于宏观了解盆地的形成、演化史，因而受到广大石油地质勘探和研究工作者的广泛重视。

含油气盆地流体演化研究是从宏观和微观、流体本身以及流体与固体间相互作用过程中残留踪迹的研究等不同角度，应用岩石学，地球化学、水文地质学以及现代分析测试技术等手段历史地追溯流体化学场、流体动力场和流体温度场的演化特征，判断流体流动的动力、通道和流体在成盆、成岩过程中的作用和贡献，确定流体流动模式及其与流体有关的矿体变迁历史和分布规律，为盆地评价和油气勘探目标的选择提供更有依据。

我们在近几年的实际工作和文献调研中，逐渐感觉到在含油气盆地研究和石油勘探中流体研究应作为一个单独的命题甚至学科来进行，国外地质界对此已有了足够的重视，并且取得了大批研究成果。因此，我们在调研大量文献资料的基础上编著了《含油气盆地流体演化研究》一书，本书从流体的流动与成岩作用，流体流动的动力、通道及模式和流体流动的识别与烃类聚集三个方面为盆地流体研究提供了有用信息。

目 录

绪论 焦大庆 梁志刚 (1)

一、流体的成因与成岩作用

沉积盆地中含盐流体的成因..... 梁志刚 武振坤 (11)

沉积盆地烃类流体的成因、运移及质量平衡..... 梁志刚 张 (32)

沉积盆地内流体流动及成岩作用..... 焦大庆 李镜皖 (44)

东濮凹陷流体温度、压力环境与次生孔隙带的分布..... 任来义 焦大庆 (58)

二、流体流动的动力、通道和模式

沉积盆地中流体流动——纵向裂缝中孔隙水流动模式..... 梁志刚 杜梅等 (68)

超压页岩微裂缝中流体流动的证据..... 梁志刚 杜梅等 (80)

巴黎盆地地层水的穿层流动..... 梁志刚 苗军等 (94)

断裂作用对孔隙性砂岩中流体运移的影响..... 高鸿斌 梁志刚 (107)

东德拉瓦尔盆地超压体系的分布及成因..... 梁志刚 任来义 (120)

三、流体流动的认识与烃类聚集

沉积盆地中流体流动热效应的认识..... 梁志刚 王长青 (136)

烃类与其它流体的共生、相互作用及勘探潜力..... 焦大庆 李镜皖 (149)

白音查干凹陷流体演化史分析..... 梁志刚 曲志浩 (160)

烃类的垂直运移作用及其勘探意义..... 梁志刚 焦大庆 (168)

绪 论

焦大庆 梁志刚

“地流体 (Geofluid)”一词首次在 1993 年 5 月在英国丹佛举行的“93 地流体”会议上正式使用，它包括了通过地下岩石流动的所有流体。对于沉积盆地来讲，“地流体”被认为是占据和通过沉积物孔隙空间而流动的任何流体。孔隙空间可以是原生的 (粒间)，次生的 (成岩演化期的溶解或化学反应) 或由断裂和裂缝作用所致。随着盆地的动力学演化地流体产生并流动，相反，它又是盆地动力学演化过程中重要的组成部分。盆地是上部地壳连续介质的一部分，其内的结晶岩石和沉积物都具有足够大的渗透率，能使连续流动系统持续数十个百万年 (Bethke, 1989, 1993)。地层流体形成的主要作用包括地层压实作用，烃类的生成作用，高温高压岩石流变作用，大气水的下渗作用和深部热演化的侵入作用。流体从成因上简单地分为在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两大类 (见表 1)。

表 1 地流体命名原则

内部流体	地层水	孔隙水
		成岩水
	烃类	油
		气
		“固体”沥青
	“流动”岩石	
人工流体		
外部流体	大气水或自流水	沉积水
		构造抬升水
	变质流体	水
		气体
	地幔流体	水
		甲烷

(据 S. R. Lawrence, 1994 简化)

含水地流体有与固体组分进行化学作用的能力，目前推测某些驱动力可能使其获得较高的流速。由于其高热容特征，流动的水能严重影响盆地内传导地热的分布，观察到的热异常与地下流体运动的热传递是一致的 (Jessop Majoroutz, 1994)。当流动方向与等温线相交时，侧向流体运动是热重新分布的有效影响因素，即所谓的热对流作用。由于流体具有搬运溶解固体物质的能力，运动流体也能导致矿物的溶解和沉淀，从而影响成岩作用，有助于矿藏的形成。

世界上重要工业之一的石油工业就是以石油和天然气形式存在的非水地流体为基础。这些流体以单一相态超临界状态产生于烃源岩之中，通常认为其形成温度范围在 110—160（油）和 140—250（气）之间。因为它们主要是在温度影响下来源于有机质，被认为是一种低温度流体。与无机反应原理不同，油气生成受化学动力学控制，它与时间呈线性关系，而与温度呈指数关系。从源岩到油藏中的油气通常认为经历了初次运移（从细粒源岩中逸出）和二次运移（通过可渗层或裂缝长距离运移）（England 等，1991）。实际上，初次运移被看作是有机相（干酪根）生成的石油分子的最早释放。它通过超压细粒矿物基质，也可能通过暂时的微裂缝由压力驱动而运动。二次运移主要由与其共生的地层水有关的密度差导致的浮力所驱动。在二次运移过程中，虽然水/油相互溶解度很低，但在水流中也可能夹带部分油气。另外，由于扩散和渗透作用沿浓度梯度方向的运动也是存在的。

因此，沉积盆地流体的重要性在于它能改变岩石的地质和地球物理特性，产生具有经济意义的矿物富集，形成烃类的聚集。因而越来越受地质学家的重视。

盆地中“流体”的流动

鉴别盆地内流体流动的方法有：(a) 直接观察（如沿断层，井中地层水和石油的流动），(b) 间接观察（油气田的存在所反映的烃类运移），(c) 成因分析（次生矿物和成岩作用），(d) 理论研究（如：对流产生的热异常）。地质学家早就认识到盆地内流体的流动，但鉴别区域性流体运移则是近期开始的（Bethke, 1991, 1993; Deming 等, 1992）。近来的研究表明，在盆地内部和外缘流体流动最重要的驱动力包括：沉积压实、浮力和重力。Deming (1994) 认为应该避免流体流动总是发生在高压与低压之间即沿压力梯度的概念，而应把流动看成是水力梯度的反映可能更合理些。流体流动的先决条件和控制因素是渗透率，而盆地内最重要的特征是渗透率趋向于各向异性，以致穿层流受极低渗透率所制约，而顺层流动则因高渗透率而得到增强（Deming, 1994），但在裂缝或断裂发育区纵向上的穿层流也是存在的，尤其是在以断裂运动为特征的断陷盆地内。

内部流体流动

盆地内部流体流动反映了随着沉降和埋藏作用的进行，沿地下动力通道的压力和温度随之增加（Kinpe 等，1994）。沉积压实作用导致孔隙度降低，流体压力升高，打破了流体流动平衡，流体流动是超静水压力的流体压力所致。流体压力的增加取决于渗透率和流向地表的途径，由此产生的流速与沉积速率成正比。来自美国的实例计算结果显示：排出流体的最大平均沉积速率从克拉通盆地的 5 m/ Ma 到前陆盆地 500 m/ Ma（Deming, 1994）。Bethke (1991) 对 Illinois 盆地模拟研究指出：沉积速率为 30 m/ Ma 时，压实驱动的流动速率小于 2 k m/ 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被认为是微弱的，但对成岩作用来说，流体可看成是热和质量传输的有效载体（Bjorlykke, 1994）。另外，Furlan 等讨论了 Mohokam Delta 盆地上新世到近代地层水对成岩作用的影响潜力。Bethke 等 (1991) 对 Illinois 盆地的研究和 England 等 (1987) 的理论推测都认为压实驱动流在埋深 3 km 以下是二次烃类运移的重要载体。

虽然超过静水压力的流体超压的存在是压实驱动流的先决条件，但应该注意到由于缺乏渗透性，细粒沉积物中超压带的形成，暗示了流体流动障碍的存在。因此，流体的流动反映存在由某种渗透介质提供的渗漏通道。富含有机质页岩中超压的形成，常因有机质热成熟作

用导致流体体积变化而得到增强，该带中流体的释放即包含了初次运移过程。当然，该过程的作用机理仍存在许多疑问 (England 等, 1987; Mann, 1994)，目前较流行的观点是超压产生微裂缝并形成垂直或水平烃类流动 (Mann, 1994)。超压页岩微裂缝中流体流动的岩石学证据也逐步得到了认识 (Capuano, 1993)。不同的应力环境和构造活动有利于微裂缝的形成 (Muir wood, 1994)。流体的热膨胀是另一种超压的形成机理。因此，也是一种潜在的流体流动机理，应用“水热压力”讨论页岩中超压的形成是一个热门课题。目前认为存在有六种可能的超压成因机理：地层的不平衡压实作用 (Dickinson, 1953; Rubey 和 Hubbert, 1959; Magara 1975; Sharp, 1976)，水热增压作用 (Barker, 1972; Bradley, 1975; Plumley, 1980)，蒙脱石脱水作用 (Powers, 1967; Schmidt, 1973; Magara, 1975; Hutcheon, 1986)，烃类生成作用 (Timko 和 Fertl, 1971; Law 和 Dickinson, 1985; Spencer, 1987)，构造作用 (Berry, 1973; Gretener, 1981)，多相流体的加入效应 (L. Snowdon, 1995)。各种作用对于特定盆地超压的形成可看成主导作用，但都不是唯一作用，而更重要的是多种机理的综合效应。Ming Luo 和 M. R. Baker 等 (1994) 在研究东 Delaware 盆地超压体系的分布和成因时指出，其超压的形成是不同作用机理在不同地质时期、不同埋藏深度、以不同方式作用的结果。

变形是盆地动力学演化的重要组成部分，其中断裂和裂缝作用是盆地形成过程中基本作用之一 (如：裂谷盆地正断层、前陆盆地逆断层、拉—张盆地中的走滑断层)。在盆地演化过程中断层既可以作为流体流动的通道，也可以阻挡流体流动，并且在一定程度上为不同来源的流体提供一个复杂的三维通道 (Knipe, 1993)，特别是在断陷盆地内强烈的断块运动，造成的断裂可以沟通凹陷沉积体内各种流体的混合。含油气断陷内各类复式油气聚集带的形成即是断裂作为流体运移通道和封隔体双重作用的结果。盆地内部或沿其边缘基底与盖层之间存在大量的断裂带 (由于其固有的渗透性)，对流体流动有重要的控制作用。沉积盆地内断层 (尤其是走滑断层) 对导致分隔的流体体系之间的流体交换的穿层流动起着主要控制作用。Worden (1994) 认为巴黎盆地是与主断裂有关的穿层流动的一个实例。研究含油气断陷盆地内流体穿层流动和聚集的特征具有极为重要的现实意义。

与活动断裂有关的流体流动模式是根据地震观察和来自水热脉的证据而建立的 (Muirwood, 1994)，并认为应力环形分布对岩块渗透性具有重要的影响，因而能调整流体流动。近年来应用地质力学原理和计算机模拟技术探索烃类分布与局部应力场的关系，从动力学角度研究流体承受的地应力特征得到了许多学者的重视。Sibon (1994) 认识到流体重新分布的三种基本作用机理即沿扩张断裂带、局部后地震期超压带 (包括“地震激发”) 和通过“断层阀”作用的超压带的膨胀作用。地震理论认为正断层具有后地震期的压性回弹，并排驱大量流体的特点；而逆断层具膨胀性回弹能增加孔隙度而吸入流体的特点 (Muirwood, 1994)。因此，断层的作用可看成是长时间流动体系中流体流动的调整作用。

Van Balen 等 (1994) 讨论了裂谷盆地中低应力偏差变化 (所谓“平面”应力) 对流体流动的影响，其结果显示，增加平面压应力导致翼部抬升，盆地中心下沉，因而增加大气水的流入和压实流体的超压；而平面张应力的增加明显具有相反的结果。

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，以及随深度增加而增加的数值是不同的。如果介质层有一定的渗透性且孔隙体厚度足够大，即使缺乏盐度梯度也易于形成对流的倒转，计算结果显示在相对于重力矢量倾斜 5° 以上的多孔介质层中总会出现一些对流性流动 (Deming,

1994)。象 Worden 和 Matray 对巴黎盆地描述的一样，通过沟通上、下含水层的断裂使穿层对流得到加强。Bethke (1989) 认为：可用慢速物质迁移的累积效率来解释盆地中的成岩作用，但发现对于大量物质迁移，一般的对流速率太慢 (Bjorlykke, 1994)。对于埋深 3km 以内的烃类非对流性浮力驱动流动被认为是一种重要的二次运移机理 (England 等, 1987, 1993)。

盆地“外部”流体的流入

沿含水层或断层一定深度和长度范围内重力驱动的大气水流动有很好的文献记录 (Bethke, 1989)。在前陆盆地内数百公里的流动是可信的 (Bethke, 1989; Deming 等, 1992)。经计算得到的流动速率从 100km/ Ma 到 5000km/ Ma, 前者是以 Alaskan 北部的斜坡盆地的热流研究为基础而得出的, 后者来自 Bethke (1991) 对 Illinois 盆地的模拟结果。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。进入盆地的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。大气水流对由平流产生的热传递有很大的影响, Vasseur 和 Demongodin 提出一个理论模型用以模拟大气水流对盆地热传导干扰的影响程度。其结果很好地解释了在前陆盆地中所观察到的热流影响 (如 Deming 等, 1992), Person 等用一维模拟技术研究了裂谷盆地中地下水流对热史的作用。大流量的大气水被认为是成岩作用的一种重要控制因素。另外, 水动力对二次烃类运移可以是正效应也可以是负效应 (Bethke, 1991; England, 1993), 后者可以形成水动力圈闭。盆地演化后期大气水的下渗对烃类的重新分布具有决定性的作用。

盆地流体研究的主要内容

沉积盆地内沉积盖层包括“沉积骨架”和“孔隙流体”, 从现有的沉积盆地分析的研究内容看, 由于传统理论和技术条件上的影响和限制, 地质学家仍然把固体岩石作为研究重点, 普遍侧重于沉积盆地的“骨架”特征分析, 而对处于“岩石骨架”孔隙中的流体研究较少, 更缺乏系统的理论基础。但是沉积盆地作为一个动力学演化的整体 (Allen J. R., 1994), 随着盆地的动力学演化, 地层流体产生流动, 相反它又是盆地演化过程中重要的组成部分, 尤其是其潜在的热和质的传输能力, 对各类矿藏的形成、聚集具有关键的控制作用。因此, 盆地流体历史分析 (Fluid History Analysis, FHA) 被认为是沉积盆地分析的重要组成部分, 也是油气勘探的重要手段之一 (Eadington P. J 等, 1991)。赵重远等 (1993) 强调在含油气盆地地质学系统研究中盆地内流体动力作用与流体动力过程研究的重要性。

沉积盖层作为多孔隙连续体, 其中各种流体的集合在三维空间和一维时间上存在一个连续的流体场。沉积盆地内固体与流体的自身运动及其相互之间的作用均受控于该流体场的演化历程。

含油气盆地流体历史分析是近几年才逐渐发展起来的一门盆地分析技术和油气勘探方法 (Toth J., 1987, Eadington P. J. 1991), 其研究内容由各自强调的重点不同而有所差异。Toth J (1987)、楼章华 (1995) 强调对地层流体中地层水动力作用的研究, 认为沉积盆地流体历史分析的研究内容包括流体化学史和流体动力史, 其中流体化学史主要是水化学史; 流体动力史的核心是水动力史, 它是盆地演化过程中各地质时期的气候、水文网、地热和不同岩性地层单元的沉积埋藏史、构造演化史以及它们在三维空间的组合关系在孔隙流体中的

综合反映。它是决定 (1) (油田) 水化学史, (2) 油气运移方向、运移模式, (3) 油气聚集、分布规律, (4) 地层压力场的形成, 演化和 (5) 储层孔隙演化史的关键因素。

Eadington P. J (1991), 王飞宇 (1995) 则强调对烃类流体流动路线、期次的追溯和成藏模式信息的提供, 认为油气藏的形成是烃类流体从源岩到圈闭的运聚过程, 成藏属动态的历史过程, 成藏研究的两个焦点是圈闭和烃类流体, 流体历史分析应着重研究烃类流体的生成和运聚以及与油气藏形成的关系, 其研究对象主要是烃类流体, 其目的是: (1) 追溯烃类流体从源岩到圈闭的踪迹, (2) 提供石油运移成藏信息, (3) 建立烃类流体运聚模式和储层流体形成史模式和 (4) 正确认识 and 划分含油气系统。强调从储层或油气藏 (Reservoir) 入手, 将储层有机岩石学、成岩矿物同位素地质年代学、油藏地球化学三个方面的实验室研究与构造发展史, 埋藏史、热演化史、沉积成岩史四个方面的地质历史分析相结合来研究烃类流体的运聚史, 定量分析油气藏形成期及成藏演化史。

地下流体是沉积盆地中的基本组成, 由于其高热容特征, 它能传输大量的热, 流动的水能严重影响盆地内传导地热的分布, 因而也影响着沉积物的地温演化、烃源岩的成熟度 (Person 等, 1993) 和储层的成岩变化 (E w m mer 等, 1989)。许多观察到的热异常与地下流体运动的热传递是一致的 (Jessop Majorouts, 1994)。当流体流动方向与等温线相交时侧向流体运动是热重新分布的有效影响因素即所谓的热对流。热流体活动可以造成热异常和物质的迁移, 我们可以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 (孙永传等, 1995)。

因此, 沉积盆地中流体场可以其化学组成、温度和压力三个特征量来表示。流体应包括其内的水、烃类等不同成分。含油气沉积盆地内流体历史分析的主要内容 (图 1) 包括流体化学场、流体动力场和流体温度场及其演化史。流体化学场研究流体的化学组成、流体成因、流体与岩石骨架之间的离子迁移水—岩作用产生的无机和有机成岩变化及其随时间的演化。流体动力场的核心是水动力场, 地层水作为地下流体的主体, 其水文体制、流动型式在很大程度上影响着其他流体的运移、聚集特征, 但在含油气沉积盆地中烃类的生成、运移作用导致的超压的形成, 流体组成的改变以及对流体运移通道的属性的影响也是不容忽视的影响因素。流体的一切作用均是在一定的温度下进行的, 流体是热能最直接的载体, 流体温度场是深部基岩热传递和局部热对流的综合结果。温度场在一定程度上反映了流体的流动特征, 控制了流体化学组成的变化, 以及流—岩反应的进程和速率。

通过流体历史分析应获得下列石油地质信息:

- a 了解沉积盆地水文体制, 流体流动型式。
- b 研究储层的流—岩相互作用, 建立储层孔隙演化史。
- c 建立沉积盆地内流体分隔体系的空间立体模型, 探讨成岩、成烃与流体运移三者之间历史动态关系。
- d 划分流体运移阶段, 研究不同阶段的流体特征, 建立烃类运移模式的纵向演化。
- e 追溯烃类流体从源岩到圈闭的踪迹, 提供烃类成藏信息, 划分含油气系统。

沉积盆地流体历史分析的基本原理和方法

1. 流体化学场

含油气沉积盆地中现今的流体化学场是随着沉积盆地的演化，原始地层流体经受了多种因素长时间综合作用的结果，因此，流体化学场在平面上和剖面上均存在严重的差异性。在分析各局部水动力单元内孔隙流体的化学组成、流体来源和成因的基础上，建立现今流体的化学场，并可进一步通过研究自生矿物的种类、结晶顺序、流—岩反应条件、离子迁移特征、成岩演化序列以及自生矿物同位素组成及其年代学、自生矿物中流体包裹体特征、有机质向烃类的转化过程油—油、油—岩对比、运移特征和有机岩石学研究以达到恢复流体化学场的目的。

含油气沉积盆地流体化学场在剖面上具有明显的分带性，在平面上具有明显的分区性。流体化学场在剖面上的分带性是由于在沉积盆地的演化过程中，影响流体化学组成、性质的各种因素对流体的影响能力随着埋深的增加发生阶段性的变化，如粘土矿物的脱水作用、泥岩压实排水作用、有机质的成烃作用都具有明显的阶段性。

流体化学场的平面分区其原因在于沉积盆地水文体制 (Galloway W. E. 1985) 和局部水文动力单元性质 (楼章华, 1995) 是控制地下流体成因的关键因素。Galloway (1985) 曾将沉积盆地水文体制划分为大气水、压实水和温压水 (Thermobaric Water) 三种类型，它们具有不同的来源和化学特征。高瑞祺等 (1995) 将松辽盆地地下水动力单元划分为：(1) 泥岩压榨水离心流 (2) 大气水下渗向心流 (3) 越流、越流—蒸发泄水和 (4) 滞留四种类型。

在漫长的地质历史过程中，溶解于孔隙流体中的活性离子与沉积岩石骨架要发生各种生物的、物理的和化学的流—岩反应。越来越多的证据证实地层水中主要阳离子组成在很大程度上受地层水与周围矿物相互间趋于亚稳定热动力平衡过程的影响 (Hanor, 1994)。由于各种离子的反应强度、流体所处温度、压力环境、流体化学性质的差异形成了具有明显阶段性的各种成岩作用，影响了孔隙流体的化学组成。因此，通过各种成岩作用、自生矿物的流—岩作用的研究可以恢复地下流体化学场随时间的演化模式。

成岩自生矿物序列的岩石学研究、同位素组成及地质年代学分析、流体包裹体的测定 (Eadington P. J 等, 1991) 以及有机质向烃类转化作用研究和有机岩石学研究均是恢复地下流体化学场的重要手段和方法。

孔隙流体中的物理化学性质决定了自生矿物的种类和自生矿物的同位素组成，反过来，自生序列和自生矿物的同位素组成又能反映孔隙流体的物理、化学性质的形成和演化。尤其是国际上八十年代后期逐步发展起来的成岩矿物同位素年代学分析提供了成岩矿物形成的时间。利用自生矿物 (主要是伊利石) 的同位素年代学分析烃类进入储集层的时间已成功地应用于分析北海油田等地区烃类成藏时间 (Lee 等, 1988, 1989; Liewig 等, 1987; Glasmann 等, 1989; Hamilton 等, 1989, 1992; Hogg 等, 1993)。其基本原理是砂岩储层中自生伊利石仅在富钾的水介质环境中形成 (Hogg 等, 1993)，当烃类充填到储集层，其中自生矿物形成作用便中止了。因此，利用砂岩储层自生伊利石的同位素年龄来判断油气藏的形成时间，根据平面上和剖面上自生伊利石同位素的年龄分布可以判断油气成藏的速度以及烃类运移的方向。王飞宇等 (1995) 利用砂岩储层中 $< 2\mu\text{m}$ 的自生粘土矿物 K/Ar 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年代学和激光显微探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法分析了塔里木盆地和吐哈盆地中一些储层样品的烃类进

入储集层的时间。

近 20 年来由于许多先进分析测试技术的引进和应用, 矿物包裹体研究发展很快, 尤其是沉积岩中矿物流体包裹体的研究取得很大的进展, 成为盆地流体追踪研究的有效工具之一。在自生矿物的形成过程中, 孔隙流体可以被生长过程的自生矿物所包裹, 这种流体包裹体可以代表自生矿物形成时的原始地下流体样品。应用现代先进的测试技术如: U. S. G. S 气流冷热系统, 英国 Linking 自动化程度很高的冷热台系统, 能观察微量有机包裹体和进行图像处理的双聚焦激光显微镜, 单个包裹体分析的激光拉曼仪等, 以及包裹体群的 D、¹⁸O、¹³C 同位素和 GC - MS 分析技术等, 通过对不同时期不同成岩阶段的流体包裹体的类型、分布特征、均一温度、盐度、化学组成等多种测试, 可以全面研究和追踪盆地流体的组成、性质、成因、活动期次及流体的古温、压条件 (刘德汉, 1995), 再与连续的成岩自生矿物相结合, 就可以恢复孔隙流体化学性质的演化史, 追踪其化学组成与变迁 (施继锡, 1987)。

沉积盆地内与无机碎屑颗粒同时沉积、埋藏的有机质, 随埋深将发生各种生物的、化学的、物理化学的反应, 并在一定的温度、压力条件下转化为液态和气态的烃类和各种无机气体 (如: H₂O、CO₂、H₂S 等) 和固态的干酪根或干沥青。新生流体的加入将严重影响地层流体的化学性质和改变各种流—岩反应的方向、速度、产物等。因此, 有机质生烃作用演化史的研究结合成岩序列特征可以追溯孔隙流体的化学组成演化史。

研究地下稀有气体的同位素组成可以了解地下流体场特征, 因为不同流体间的相互作用可以导致不同流体场之间同位素的平衡, 从而导致大气成因的稀有气体可转移进入烃类流体中 (Bosch 等, 1988; Ballentine 等, 1991)。通过对地层流体中同位素的精确定量分析, 可能辨别不同成因的稀有气体, 定量分析其分布特征, 确定流体注入地层的各种边界条件以及各流体之间的混合程度 (Ballentine, 1984)。

另外, 对烃源岩和储集岩中烃类流体残迹的有机岩石学分析可为烃类流体的排出方式、运移相态和途径、聚集成藏时间的研究提供直接的信息。烃类流体的残迹包括: 次生显微组分渗出体或运移沥青、烃类流体包裹体、油滴、油膜、牛顿环、显微组分和矿物沥青基质光性的变化等 (王飞宇等, 1995)。

2 流体动力场

流体动力场的核心是水动力场, 但烃类流体的作用不可忽视。流体动力场研究包括今动力场、古动力场和流体流动的阻力场, 其中地下流体古动力场的恢复是流体动力场研究的关键。

依据钻井中途测试 (DST)、重复地层测试 (RFT)、完井试油资料和地形特征, 综合储层物性、地层压力系数和折算压力 (或流体势) 以及流体化学场在平面上的分布规律, 可以建立起现今流体动力场模式, 划分局部水动力单元。在建立泥岩压实理论计算压力与储层实测压力关系的基础上, 应用泥岩压实曲线可计算地层压力, 以补充实测压力数据的欠缺。

古流体动力场受外部流体和内部流体的水文地质旋回特征的控制。

外部流体的强度、影响范围及其演化, 主要依据恢复古气候—古地貌演化史, 结合水化学史, 分析大气水的下渗作用规律和影响强度。其次是通过热流体活动期次以及基底深大断裂来研究其强度和频率以及影响范围。

内部流体主要是泥岩压实水和烃类流体, 两者在很大程度上决定了沉积盆地流体场的形成和演化。在泥岩压实成岩史、干酪根生烃史和超压形成机理及分布研究的基础上, 应用泥

岩压实和干酪根热降解成烃理论，根据超压形成的作用机理，建立地下流体的连续方程和质量守恒方程来恢复地史时期古压力场的演化史，从而判断古流体的流动方向、流动强度。

由于沉积盖层中不同岩性地层单元的沉积速度、单层厚度、构造性质以及它们在三维空间上的组合关系控制了泥岩段的压实排水史，因此，人们（地质矿产部水文地质工程地质研究所等，1987）广泛应用压出水水头、沉积水动力和水交替强度来研究古水动力场的形成和演化。

伴随着沉积盆地的形成、演化，古水动力史常常具有明显的阶段性，可用水文地质旋回来表示（邱世祥，1991）。每个旋回的沉积埋藏时期和抬升剥蚀时期均有不同的水文体制和不同的流体流动型式。

在一定的水力梯度下地下流体在多孔介质中流动的先决条件是运载层具有渗透性，主要控制因素是渗透率和流体性质（相态、饱和度）。沉积盆地内最重要的特征之一是渗透性趋向于各向异性，以致穿层流受极低渗透率所制约，而顺层流动则可沿高渗透率通道进行（Deming, 1994）。

顺层流动中，在区域水力梯度控制的区域流体运移方向背景下，受沉积古水系制约，运载层砂岩分布控制了流体流动的具体运移路径，因为流体总是沿最小阻力路径流动。England (1987) 认为，在局部范围内，毛细管力将决定二次运移途经的面貌，它们应该是以一个树枝状网络运移，石油将优先选择最低的入孔压力做为运移通道（即通过较粗粒岩层）。在穿层流中，断裂和裂缝对流体的调整具有决定性的作用，它们在一定程度上为不同来源的流体提供了一个复杂的三维通道（Knipe, 1993）。Worden 认为 Paris 盆地是与主断裂有关的穿层流的一个实例。渤海湾盆地诸断陷内，油气以多油源、多层系含油、多种油藏叠合形成的各种类型的复式油气聚集带的大量发育，以及油气田环绕生油凹陷呈多环式展布的模式都反映断陷盆地内垂向流体运移、混合作用的重要性。可以认为断陷内油气复式聚集带是与断裂有关的穿层流动的结果。

3 流体温度场

流体温度场包括对今温度场特征的研究和对古地温场演化史的恢复。沉积盆地内温度参数的获得是通过对流体温度的直接测量。因此，根据实际测温数据可了解区域地温场特征，结合深部基底埋深、岩性分布可划分局部热异常区，通过与流体化学场和动力场的分析对比，来研究热流体活动和热对流效应。

随着沉积盆地的沉降、沉积和抬升作用的演化，盆地内温度场也随之发生变化。这种温度场的演化在沉积层的流体和固体（碎屑颗粒和有机质）中都会留下各种烙印，它们为我们恢复、了解古温度场提供了有用的信息。尤其是那些热成熟作用属不可逆的作用过程中形成的残迹，更是恢复古地温的可靠手段和工具。目前对于古地温恢复的方法较多，其中大家公认的可靠程度较高且应用较普遍的是 R_o 法、包裹体法、磷灰石裂变径迹法等。通过古地温的恢复，在构造演化和区域热流研究的基础上可以判断地质时期的热异常，从而辨别古地下水流动系统（Person Mark, 1995）。

参 考 文 献

- [1] 赵重远等. 含油气盆地地质学研究进展. 西北大学出版社, 1993
- [2] 邱世祥. 油田水文地质学. 西北大学出版社, 1991
- [3] E C 戴尔勃格著, 王学礼译. 石油勘探实用水动力学. 石油工业出版社, 1992

- [4] 楼章华. 含油气沉积盆地流体历史分析. 石油实验地质, 1995, 17 卷, 增刊: 1 - 4 页
- [5] 王飞宇等. 油气藏形成期和成藏演化史的流体历史分析. 石油天然气地质, 1995, 16 卷, 4 期, 265 - 278 页
- [6] 孙永传等. 莺—琼盆地 YA13 - 1 气田热流体与有机/无机成岩响应. 地球科学, 1995, 20 卷, 3 期, 275 - 282 页
- [7] Eadington P J et al. Fluid history analysis - a new concept for prospect evaluation. The A-PEA, 1991, V. 31: p. 282 - 294
- [8] Worden R H et al. Cross formational flow - in the Paris Basin. Basin Research, 1995, V. 7: p. 53 - 65
- [9] Tom Pederson et al. Fluids flow in sedimentary basin: model of pore water flow in a vertical fracture. Basin Research, 1994, V. 6: p. 1 - 16
- [10] Lawrence S R & Cornford C. Basin Geofluids, Basin Research, 1995 V. 7: p. 1 - 7
- [11] Parnell J (ed.). Geofluids: Origin, Migration and Evolution of Fluids in Sedimentary Basins. The Geological Society Publishing, 1994
- [12] Bethke C M. Modeling Subsurface flow in sedimentary basins. Geol. Rund, 1989, V. 8: p. 129 - 154
- [13] Bethke C M Reed J D & Oltz D F. Long - range petroleum migration in Illinois Basin. Am. Ass. petrol. Geol., 1991, V. 75: p. 925 - 945
- [14] England W A, Mackenzie A S, Mann D M & Quigley T. M. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. J. Geol. Soc., London, 1987, V. 144: p. 237 - 347
- [15] England W A, & Fleet A J (eds). Petroleum Migration. Spec. Publ. Geol. Soc., 1991, V. 59: p. 823 - 827
- [16] England W A. Petroleum Migration. In: Geofluids '93 (Ed. by Parnell J, Ruffell A H and Moles N. R.) 1993
- [17] Gize A P. A little rain must fall. Nature, 1992, V. 358: p. 370 - 371
- [18] Knipe R J. The influence of fault zone processes and diagenesis on fluid flow. In: Diagenesis and Basin Development (Ed. by Horbury E D and Robinson A G), Amer. Ass. Petrol. Geol. Studies in Geology, 1993, V. 36: p. 135 - 154

一、流体的成因与成岩作用

沉积盆地中含盐流体的成因

梁志刚 武振坤

摘要 根据阴离子组成和盐度, 可将沉积盆地中地层水分为三类: (1) 以非 Cl^- 根的阴离子为主的地层水, 包括 NaHCO_3 型、 CH_3COONa 型和 Na_2SO_4 型, 其盐度小于 10g/L ; (2) 以 Cl^- 根为主, 盐度介于 $10 \sim 250$ 或 300g/L 之间的地层水, 包括 NaCl 型和 $\text{Na}-\text{CaCl}$ 型; (3) 以 Cl^- 根为阴离子, 盐度超过 300g/L 的饱和地层水, 随盐度增加, Ca 逐渐代替 Na 而趋主要地位, 以 CaCl_2 型为主。

海水和大陆水的陆上蒸发及蒸发岩的地下溶解均可形成大多数由实际地层水测得的矿化度和氯离子浓度, 但却不能得到其主要的阳离子组成。随矿化度的增加, 溶解状的 Na 、 K 、 Ca 和 Sr 大幅度的系统增加和 pH 值及碱度的减少都证实下述假说: 对于地下流体的组成, 即使在低于 100°C 的温度下, 由硅酸盐—碳酸盐 (或是盐岩) 矿物组合引起的热动力缓冲作用是受一级反应所制约。在驱动流—岩交换和控制分散状流体组份上, 氯化物的化学势即阴离子的浓度与温度、压力等同样重要。相反, 该变量又在很大程度上受控于流体的平流和分散作用。

溶解状的有机酸性离子最初都与低矿化度水相伴生, 而溶解状的金属如 Cu 、 Pb 和 Zn 都常见于盐度超过 200g/L 的地层水中。地层水中较高的氯化物浓度和较低的 pH 值通过氯化物的化合作用而提高金属的溶解作用。

就体积而言, 沉积盆地中约 20% 是由孔隙水组成, 且其温度、压力和化学组成变化范围很大。这些流体的组成为地化、水文地质、热作用以及地壳构造演化提供了重要信息 (Hanor, 1988), 同时也可以此研究许多应用问题, 尤其是与矿床形成和烃类聚集有关的问题。

尽管对孔隙水组成控制作用的讨论常被认为是纯粹的化学问题, 但孔隙水组成是化学、物理参数的直接函数 (Hanor, 1984)。这些参数包括:

- (1) 沉积物沉积时, 孔隙空间中所含水的组成;
- (2) 水与组成沉积基质的周边固体和其他可能存在的流体 (如气体、液态烃) 之间成岩组份交换过程中的净效应;
- (3) 由体积流和水的混合作用引起的进入或带出沉积物的物质传输作用。

根据溶液中溶质或同位素的质量守恒, 上述参数均可以下式加以说明:

$$\frac{C_i}{t} = R_{ij} + [(-V \cdot C_i) + (\cdot (D \cdot C_i))] \quad (1)$$

式中： (C_i/t) 为溶液中溶质或同位素 i 浓度 (C_i) 随时间的变化。这类等式中常见孔隙度 (ϕ)，但这里视为常量而未考虑。右边 R_{ij} 表示成岩反应对溶质 i 在浓度上的净效应。

R_{ij} 代表导致从溶液中去掉或增加溶质 i 的第 j 个成岩反应的速率。 $(-V \cdot C_i)$ 中 V 为流体速度场，定义溶解溶质 i 的增加或失去是时间的函数，且认为是体积流通过沉积物流动的结果。 $(D \cdot C_i)$ 代表由扩散和分散混合作用而引起的组份变化的净效应。 D 是描述与给定的浓度梯度和流体流速有关发生混合作用程度的分散张量。当我们将 (1) 式对时间积分时流体的原始浓度是重要的。

Hanor (1994) 曾报道了流体流动，溶质的运移和分散作用过程。本文主要从地球化学角度研究地下沉积水的成因即地下流体的原始和现今组成以及 (1) 式中的 R_{ij} 。强调的是深部高矿化度流体。

本文所用的“盐度”，即总的已溶固体含量。由以下方法确定：(1) 由测量已溶组份的总量或称重蒸发后的固体残余物直接求得，(2) 由导电率或自然电位响应间接求得。盐度和主要溶质的常用浓度单位是 g/L ，流体密度已知时可转换为质量/质量浓度或重量克分子浓度。

对盐度超 $100g/L$ 的孔隙流体许多人仍使用“卤水”一词，其中，Carpenter (1978) 的分类最为流行。由于未对 $100g/L$ 下限值作明确规定，在此不严格的使用“卤水”一词。

天然水是指沉积时包含于沉积物孔隙空间的流体，其固有的特征，如特有的同位素组成或 Br/Cl 比等，是在沉积时作为沉积物一部分的流体的主要物理、化学性质。由于沉积后的化学变化和物理迁移，极少有地下流体是真正的天然水。

由于在研究流体溶质和能量垂直传输的数值问题时海拔常以变量出现，因而本文一直用海拔 (Z) 而不是深度 (D) 来表示地层水的相对垂直位置。部分图件采用了海拔，其数值是深度的负值。

历史回顾

Hanor (1983, 1987) 曾详细地回顾了沉积盆地中盐水成因的认识，归纳如下：远古时代人类就认识了卤水泉，那时人们用从其中提取的盐来保存食物。文字记载的有关地下盐水成因的资料始于近 2500 年前的 Anaxagoras (公元前 500—公元前 428 年)，他认为海水是地球内部的水体蒸发而留下的高盐度残留物。Lucretius (公元 99—公元前 55 年) 则认为海洋水经地下循环进入大陆、上升并通过河流又流入海洋。整个中世纪有关卤水成因的主导观点认为：海水以某种方式进入地球内部，又由局部热源蒸馏后穿过地壳。这些蒸馏作用产生的蒸汽在冷却环境中凝固，最终以淡水泉的形式出露于地表，并伴随着形成卤水和石盐矿床。Perrault 基于质量守恒讨论了泉水的洪积成因，反对泉水是地下循环和海水蒸馏结果的说法。他认为连续不断的蒸馏最终会形成一个充满盐的地球和无溶解盐的海洋。

十七世纪七十年代，在英格兰 Cheshire 石盐附近发现地下卤水，使人们认识到卤水是地下石盐溶解的产物。Hitchcock (1845) 总结了十九世纪许多地质学家的普遍看法：“在欧洲许多地方发现了直接来源于石盐层的盐泉，其成因是显而易见的，许多美国地质学家……坚持认为我们的盐泉来自石盐层。”

随着分析化学的发展，人们有可能分析出盐水中各类已溶组份。Hunt (1879) 指出：加拿大下古生界碳酸盐岩中的盐水“只有半数的氯与钠结合，其余则以 $CaCl_2$ 、 $MgCl_2$ 形式

存在，并以前者为主，仅出现少量的碳酸盐”。据上述结论，Hunt 推论：这些水是古老海洋水，且当时海洋水的组份与现今海洋水的组份有很大的差别。Lane (1908) 引用了希腊语“天然水 (同生)”来描述组份相似的水。理论上讲，不同地质时期真正的天然水可用来重建海洋水地球化学史。

随着 20 世纪初期油气工业的飞速发展，获得了大量的地层水资料（与油气资料同时得到），并很快形成了“油田卤水是天然水”这一假说，Washburne (1914) 曾怀疑在变形和后来的大气地层水循环中已埋藏的海水以死孔隙流体形成保存下来。Richardson (1917) 进一步怀疑在地质历史时期，像水这样的活性溶剂的化学组成会保持不变。

产气层中常见到盐水，促使了地下蒸发形成盐水这一机制的再现。Russell (1933) 在广泛研究了各类卤水形成作用之后认为，基于质量守恒计算，蒸发作用充其量只能产生小体积的卤水。Russell 首次提出，卤水可能由他所称的“负渗析作用”而形成。在此过程中，水流过经压实的粘土和页岩薄膜。

随着分析技术的稳步发展和分析设备的广泛普及，近几十年来有关地下水的溶质及同位素组成的资料大大增多。复杂含水溶液热动力模拟技术的改善和对沉积盆地中流体流动特征的进一步了解为解释地下流体化学诸方面的特性提供了坚实的基础。

沉积盆地中含水流体的组成

在过去 20 年中，沉积盆地内有关地下水组份的分析资料的大量增加，在一定程度上表明：地下水可视为沉积盆地中成岩和水动力演化的标志。本文所用的资料主要来源于美国诸盆地和法国巴黎盆地以及加拿大阿尔伯特盆地，选择这样的数据库即可反映分析上的可信度，又反映在盆地背景、时代和盐度上有一定的变化范围。

盐度

沉积岩孔隙水盐度变化范围达五个数量级，由浅层的大气降雨流动系统中的几 mg/L 增至像美国密执根盆地等富含蒸发岩的盆地中超过 400g/L。见到报道的最咸的地层水是密执根盆地 Salina 地层中 CaCl₂ 型的卤水，为 634g/L (Case, 1945)。

在一些盆地中地层水盐度随深度而增加，但例外的情况亦值得注意，如南路易斯安娜的墨西哥湾地区，最咸的水出现在剖面上部 3km 的范围之内 (图 1)。在给定的沉积盆地和深度段内盐度的变化范围很大。正如 Hanor 及其同事所认为的 (Hanor 等, 1986, Hanor 和 Sassen, 1990)，这些盐度的空间变化特征为解释 (重塑) 已溶盐的来源和导致其运移和分散的物理过程提供了有意义的边界条件。

许多沉积盆地地层水的盐度都超过平均海水含盐度即 35g/L，当然并不是所有的沉积盆地都含有超盐度水。著名的例子有美国加利福尼亚的 San

图 1 西南路易斯安娜湾海岸地区地层水中溶解固体总量 (TDS) 与海拔交汇图

Joaquin 盆地 (Fisher 和 Boles, 1990) 和东南亚的各类盆地 (Lundegard 和 Trevena, 1990)，其盐度一般都接近海水盐度或更小，这类盆地可能是缺乏蒸发岩。

研究地层水化学演化时的一个有用概念是“天然水”（或原始水）盐度即在沉积物沉积时被圈闭在给定的孔隙空间或沉积物中的地层水盐度。由于排替、分散等物理作用和溶解或沉淀等化学作用的共同影响现今孔隙空间或沉积物中所含地层水盐度差异较大。原始的和现今的盐度对比可为成岩作用和质量传输模型提供重要的边界条件。例如：南路易斯安娜的墨西哥湾地区的碎屑岩沉积层序形成于河流、三角洲和正常海相环境中。因此，可以认为这些沉积物在沉积时很少含有盐度远大于 35g/L（正常海水盐度）的流体。由卤水的大规模垂向和侧向运移的结果，现今这些沉积物中地层水盐度都超过 100g/L（Hanor 和 Sassen, 1990）。

主要阴离子

在盐度超过 10g/L 的大多数沉积地层水中，氯根占阴离子总量的 95% 以上（图 2）。很少有卤水以重碳酸根、硫酸根或醋酸根为主要阴离子。研究沉积盆地中卤水的成因，在很大程度上即解释溶解状氯根的成因。

图 2 地下盐水中主要阴离子和阳离子质量相对丰度

主要阳离子

相对阴离子组成，沉积地层水中阳离子则随盐度的增加而发生渐进式变化。根据质量计算，在盐度低到中等的地层水中钠是主要阳离子，但随盐度的增加，Na 的相对比例减少而 K、Mg 和 Ca 的比例增加。最明显的是 Ca 的增加，在盐度超过 300g/L 的地层水中 Ca 成为主要阳离子。

高盐度的成因

许多地层水往往比陆相或海相地层在沉积时形成的原生水含有更高的盐度，关于地下水组成最基本的问题是其所含高盐度的成因。下面将讨论高盐度形成的潜在作用过程。

1) 地表蒸发作用

海水蒸发作用：海水的蒸发作用是决定沉积盆地中流体组份的最重要的作用之一。随水不断的蒸发不仅可以向下渗流入地层，而且还可能使 Na、Ca、Mg、K 和 Cl 陆续沉淀出来。这些蒸发矿物在埋藏过程中同粒间流体相互作用，逐渐转变成地下流体的成份。

由海水蒸发形成的卤水，其残余成分演化的一般规律在 Carpenter (1978) 的经典著作中已有很好的解释。McCaffrey 等 (1987) 对海水蒸发作用进行了详细的研究，它对 Bahamas 晒制石盐设施中的石盐和盐水进行取样和分析，实验中将取得的最咸的卤水样作进一步的浓缩。McCaffrey 等报道：他们用卤水中 Mg 含量/海水中 Mg 含量和卤水中 Li 含量/海水 Li 含