

压实与油气运移

陈发景 田世澄 主编

中国地质大学出版社



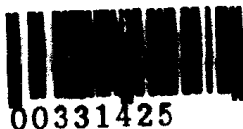
49723

国家自然科学基金资助项目
科基金地准字第 0901 号

5422/27

压实与油气运移

主 编 陈发景 田世澄
编著者 陈发景 田世澄 马 正
张博全 陈建渝



中国地质大学出版社

49723



00331425

压实与油气运移

主 编 陈发景 田世澄

责任编辑 段连秀

*

中国地质大学出版社出版

中国地质大学出版社印刷厂印刷(激光照排胶印)

湖北省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 11.5 插页 2 字数 292 千字

1989 年 7 月第 1 版 1989 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—1200 册

ISBN 7-5625-0259-5 / P · 73

定价: 10.60 元

内 容 简 介

压实与油气运移是石油地质学中具有重大理论意义和实践意义的课题。该书是陈发景和田世澄等在承担国家自然科学基金“压实与油气运移”项目后所完成的一本科学专著。作者以黄骅坳陷、泌阳凹陷和三水盆地作为典型实例，采用地质构造分析、地球物理测井和有机地球化学实验以及模拟实验等方法，重点研究了下述五个问题：

- (1) 利用声波测井和其它测井资料，研究泥岩压实作用及地层孔隙流体压力特征；
- (2) 研究压实作用和油气生成及运移的关系；
- (3) 研究油气运移的地球化学指标；
- (4) 进行压实与流体运移的模拟实验；
- (5) 研究断陷盆地中油气运移的特征及油气初次运移量计算。

该书理论联系实际，运用了国内外近年来新的理论和方法，结合中国的实际进行工作，总结出我国东部断陷湖盆的压实和油气运移的特征。全书分七章，附图一百余幅，约20余万字。该书对于石油地质研究人员、石油地质专业教师、研究生、大学生及有关人员都具有较高的参考价值。

前 言

泥岩压实与油气运移是石油地质学中一项具有重大理论意义和实践意义的课题, 深入研究泥岩压实作用不仅有助于探讨油气初次运移的机理、估算烃的排出量、为盆地油气定量预测提供有关的重要参数, 而且还可以确定油气二次运移的途径和方向, 为盆地的进一步勘探指出方向。

在国内泥岩压实与油气运移的研究工作起步较晚, 尤其是综合运用地质构造资料、地球物理测井资料、地球化学分析资料、物理实验资料对一个典型盆地进行系统的研究成果不多, 为此作者申请中国科学院自然科学基金, 从 1984 年 6 月起开始了这项工作, 研究重点放在以下几个部分:

- (1) 利用声波测井及其他测井资料研究泥岩压实作用及地层孔隙流体压力特征;
- (2) 研究压实作用与油气生成和运移的关系;
- (3) 研究油气运移的地球化学指标;
- (4) 进行压实与流体运移的模拟实验;
- (5) 研究断陷盆地中油气的运移特征, 计算油气初次运移量。

上述工作以华北的黄骅拗陷、华中的泌阳凹陷和华南的三水盆地为典型实例, 运用地球物理测井、地球物理(地震)勘探、有机地球化学以及实验分析等资料进行综合研究, 并用我们研制的高压控温泥岩压实仪对上述地区的泥岩进行了干压实和压实排液的模拟实验。上述地区均属早第三纪断陷盆地, 但其构造演化和压实类型均有差别, 油气生成和运移也各有特点。因此, 总结这些盆地的压实作用与油气运移特点, 对于整个中国东部断陷盆地的油气勘探具有重要的意义。

本项研究工作是在陈发景教授主持下进行的, 主要参加人员和分组如下: 构造组: 陈发景、李明诚、张树林、李勇、周国君; 油气运移组: 田世澄、陈长发、孙尚如、熊运斌; 地层压力组: 马正、程喆、王玉侠; 有机地化组: 陈建渝、王启军、张征瑞、李水福; 压实模拟组: 张博全、崔武林、王岫云、罗文君、关振良、晏皋。本校 83、84、85 届部分大学生、研究生参加了许多实际工作。

3 年来共完成的工作量计有: 读 800 余口井的声波时差值, 93 口井的组合测井读值, 收集了 200 多口井的试油测压资料, 并对上述资料进行了电算处理; 分析化验样品有: X-衍射 119 块, 泥岩孔隙度测定近 1000 块, 气相色谱样 70 块, 色谱-质谱样 24 块, 有机碳、氯仿沥青“A”、烃组分样品 50 余块。

在上述研究基础上编写了专题研究报告。报告的编写人员是: 前言由陈发景, 第一章由陈发景、田世澄、张博全, 第二章由田世澄、陈长发, 第三章由马正、程喆、王玉侠, 第四章第一节、第二节、第三节、第五节由田世澄, 第四节由陈发景、李勇、周国君, 第五章由陈建渝, 第六章由张博全, 第七章由陈发景、张树林编写。主编为陈发景、田世澄同志。

在研究工作中得到了大港石油管理局吴涛院长, 方文娟副院长, 赵学平、曲文林、田克勤、王忠然、李志文、高锡兴、赵永琪等同志, 河南油田朱永安总地质师, 朱绍璧副院长, 李纯菊、陈炳星等同志以及地矿部第十二石油普查勘探大队盛忠义总工程师、唐忠驭工程师等同志的支持和帮助, 以上单位及同志为我们的研究工作提供了资料、样品和宝贵的意见, 谨表示衷心的感谢。

目 录

第一章 研究区区域地质概况	(1)
第一节 黄骅坳陷	(1)
第二节 南阳泌阳凹陷	(3)
第三节 三水盆地	(5)
第二章 利用声波测井资料研究泥岩压实与孔隙流体压力	(7)
第一节 利用声波测井资料计算泥岩孔隙度、流体压力、 流体损失量及计算机程序设计	(7)
第二节 压实曲线的特征、类型及其控制因素	(14)
第三节 异常孔隙流体压力的分布特征及其形成原因	(27)
小 结	(33)
第三章 综合利用测井资料预测地层压力	(35)
第一节 黄骅坳陷中区地层压力分布	(35)
第二节 综合利用测井资料预测地层压力	(36)
第三节 中区地层压力分布及控制因素探讨	(56)
小 结	(61)
第四章 压实与油气运移的关系	(63)
第一节 排液组合的划分及其对油气运移聚集的控制	(63)
第二节 初次运移的深度和时期	(69)
第三节 排烃层段类型及滞烃带确定	(72)
第四节 厚泥岩层排烃问题的初步探讨	(78)
第五节 油气初次运移量的计算设想和实践	(89)
小 结	(94)
第五章 油气运移的有机地化特征	(96)
第一节 初次运移对原油组成的影响	(96)
第二节 生物标志物指标的探讨	(102)
第三节 生物降解对原油的改造	(108)
第四节 “色层效应”的讨论	(111)
小 结	(112)
第六章 泥岩压实和压实与流体运移模拟	(113)
第一节 泥岩压实阶段的划分	(113)
第二节 泥岩减压实与盆地剥蚀	(123)
第三节 泥岩压实与流体运移模拟实验	(130)
小 结	(134)
第七章 断陷盆地中的油气运移特征	(136)
第一节 断陷盆地的构造演化	(136)
第二节 油气运移指向	(143)
第三节 断层在油气运移中的作用	(150)

第四节 差异排驱压力对遮挡（封闭）作用和圈闭能力的影响	(156)
第五节 欠压实泥岩与封闭层（或称遮挡层）.....	(163)
小 结	(167)
结束语	(168)
附 表	(170)
参考文献	(175)

第一章 研究区区域地质概况

第一节 黄骅拗陷

黄骅拗陷位于河北省东部渤海沿岸地区。西边以一级沧东主断裂与沧县隆起相接，东边以缓坡形式过渡为埕宁隆起，北端可能以汉沽—昌黎一级主断层与燕山褶皱带毗连。陆地面积 11000km²，海域面积 6000km² (图 1-1)。

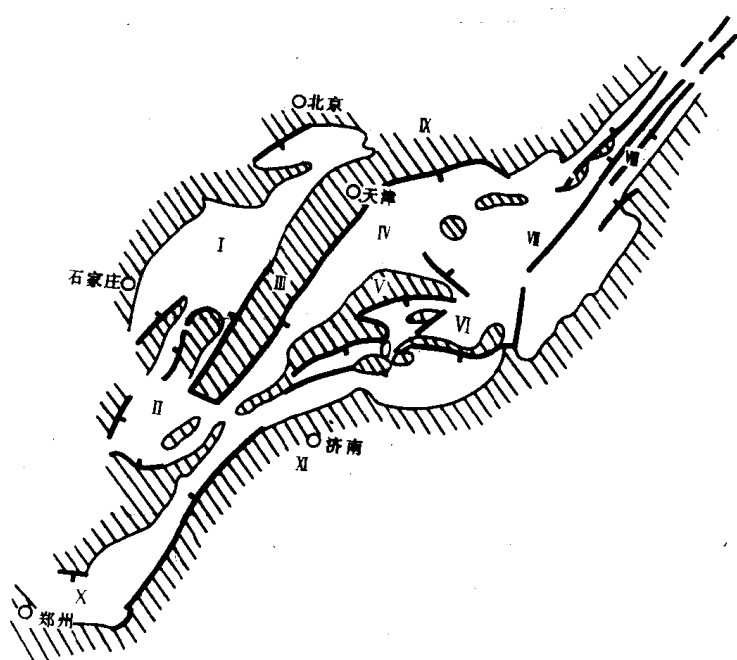


图 1-1 渤海湾盆地黄骅拗陷区域构造示意图

I 冀中拗陷 II 临清拗陷 III 沧县隆起 IV 黄骅拗陷 V 埕宁隆起
VI 济阳拗陷 VII 渤中拗陷 VIII 下辽河拗陷 IX 燕山褶皱带
X 开封拗陷 XI 鲁西南隆起区

黄骅拗陷是在华北地台冀豫台向斜基础上发育起来的早第三纪盆地，具有多个单断箕状凹陷特征。拗陷内次一级单断凹陷一般沿一级或二级主断层的东南侧或南侧分布，以缓坡形式过渡为凸起，这即通常称为“西断东超”或“北断南超”。稍后，在缓坡上发育的三级反向调节断层，演化形成双断凹陷。

在断凹断凸形成过程中，由于伸展作用不均衡，产生横向调节作用，导致形成横向凸起，并伴生横向正断层。例如黄骅拗陷内部就是由于这类为长芦、海河断裂复杂化的塘沽凸起和为羊三木、黄骅断裂复杂化的大中旺—黄骅凸起被分成北、中、南三区。

在南区主要发育双断凹陷、凸起块断体，由沧东凹陷、小集凹陷、盐山凹陷、孔店凸起和徐杨桥—黑龙村凸起组成。在中区以单断凹陷、凸起块断体为主，由板桥凹陷、歧口凹陷和北大港、南大港凸起形成。平面上，南区的徐杨桥—黑龙村凸起、孔店凸起和中区的北大港凸起可能继承前第三系基底断裂，有呈雁行排列的趋势。断凹、断凸以及其间发育的一、二、三级断层之间的距离在南部较窄，向中部、北部呈帚状散开。凹陷、凸起以及分割它们的纵向正断层走向自南而北，一般从北北东向、北东向转为北东东向和近东西向。

在黄骅拗陷断陷背景基础上，沉积了下第三系孔店组 (Ek)、沙河街组 (Es)、东营组 (Ed) 以及上第三系馆陶组 (Ng)、明化镇组 (Nm) 和第四系 (图 1-2)。

下第三系本身构成一个大的沉积旋回，它由三个次一级旋回组成。其地层发育特征如下：在始新世为双断式块断体，主要分布于南部地区。断陷湖盆孤立分布，互不连通，沉积了内陆河流、湖泊沉积物。剖面上组成第一个次一级旋回，为红黑红、粗细粗沉积物组成。

到渐新世沙三段沉积时期，断陷广泛发育，湖盆水域范围扩大。各个断陷在其凹陷中心，为凸起分割，但水体连通。因此在很大范围内沉积了沙三段湖相砂泥岩沉积物。沙三段沉积本身构成第二个次一级旋回。沙三段沉积时期末，局部水退。从沙二段至沙一中期，开始了第三个次一级旋回，凹陷、凸起从单断演化为复杂双断，为水进型沉积，发育砂泥岩以及少量

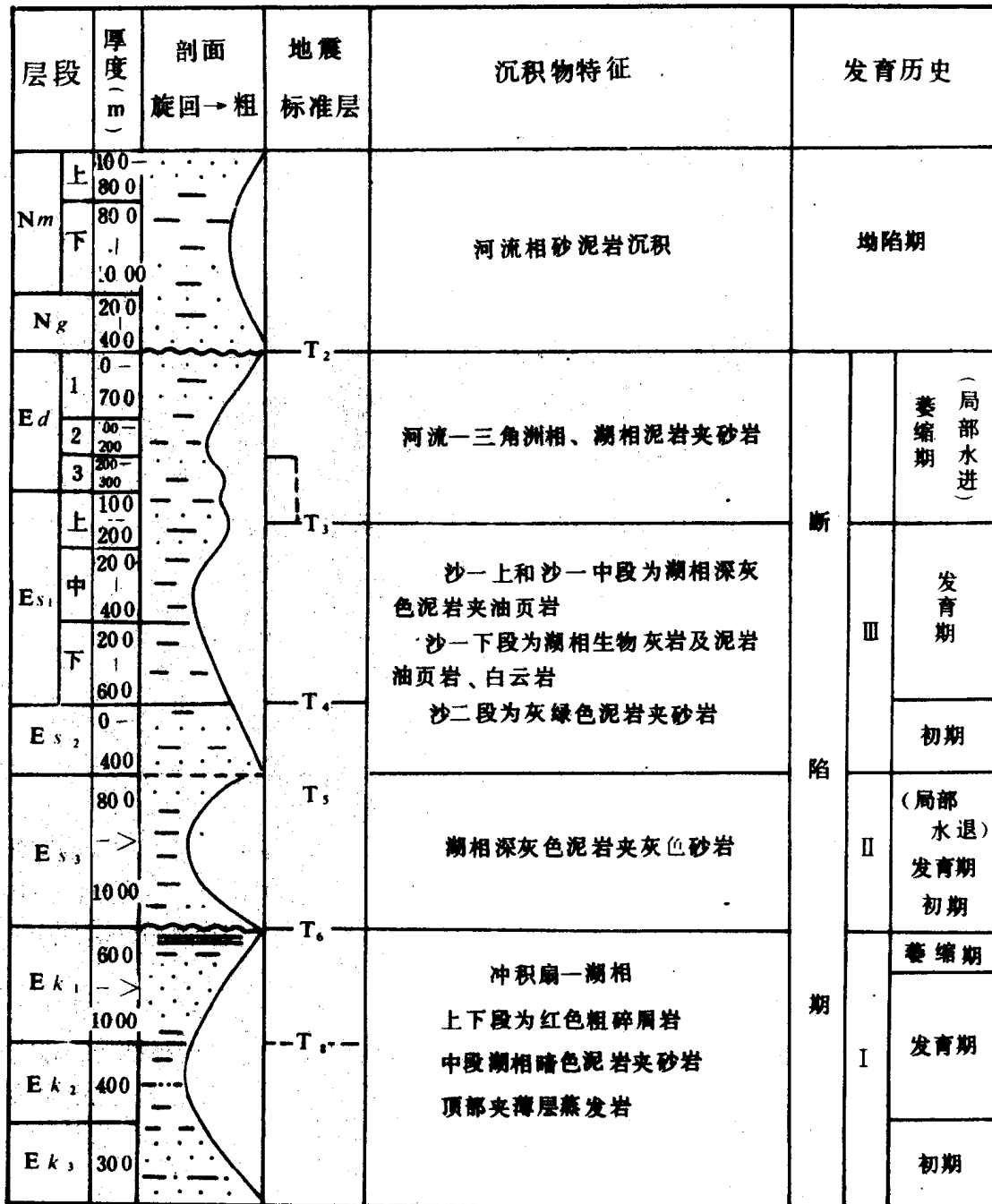


图 1-2 黄骅拗陷第三系地层柱状图

异化学灰岩等内陆湖泊沉积。渐新世晚期，即从沙一上期至东营期，湖盆总体萎缩（东二段局部水进），为水退型沉积，多发育湖泊三角洲沉积。断陷中心从多个转为单一（主要是位于歧口凹陷）。最后断陷湖盆以上升而告结束，表现为上、下第三系地层之间广泛分布的区

域不整合面。晚第三纪转化为大陆内坳陷，以河流沉积体系为特征，总厚有 2000 余米。

综上所述，黄骅坳陷区域地质特征主要是：

- (1) 为多个单断凹陷和凸起组成，后期演化为双断；
- (2) 由早第三纪河流、湖泊相和晚第三纪河流相沉积物组成。早第三纪断陷的沉降中心与沉积中心基本吻合，这也是欠压实带和异常高孔隙流体压力分布集中的地区；
- (3) 早第三纪断陷内分布有孔二段、沙三段、沙二段和沙一下段生油岩，除了发育下第三系自生自储油气藏外，由于沿断层垂向和穿断层侧向运移，还发育上第三系下生上储油气藏和新生古储油气藏（中生代火山岩次生油气藏，早古生代碳酸盐岩油气藏）。

第二节 南阳泌阳凹陷

南阳和泌阳凹陷属南襄盆地，它是在东秦岭褶皱带上发育的晚白垩世一早第三纪断陷盆地。整个盆地由于受基底块断活动的持续影响，被分割为发育历史有差异的四个凹陷三个凸起，即北部的南阳凹陷、泌阳凹陷和其间的社旗凸起，南阳凹陷北部的师岗凸起和南部的枣阳凹陷、襄阳凹陷以及其间的新野凸起。其中南阳凹陷面积 3600km²，泌阳凹陷 1000km²（图 1-3）。

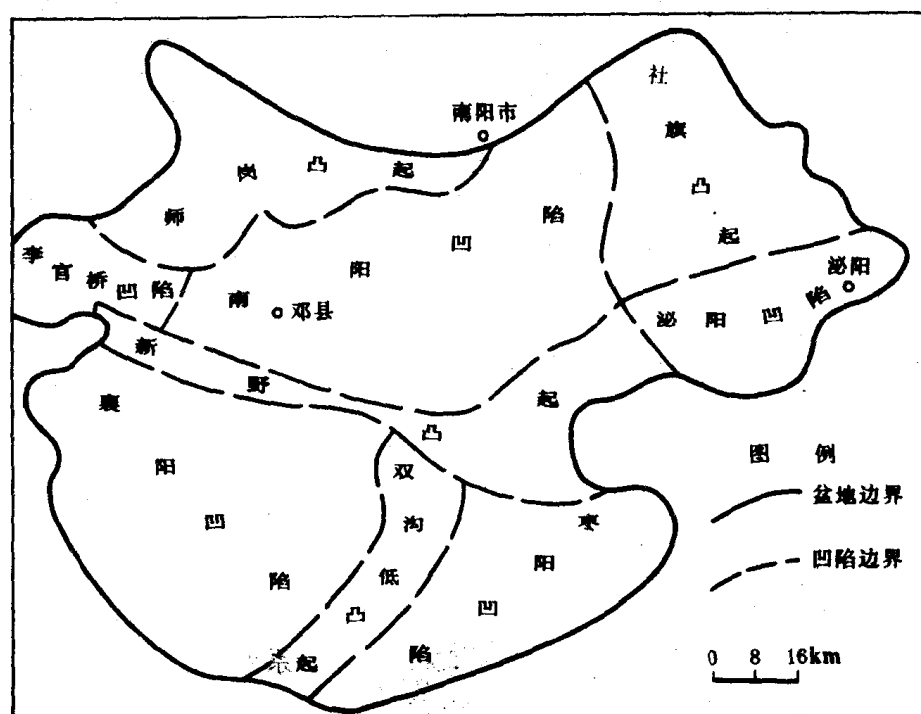


图 1-3 南襄盆地地区构造单元划分示意图

南襄盆地开始形成于晚白垩世。断陷盆地的发育表现出三个明显的发展阶段：早期的断陷充填式沉积，主要是晚白垩世到早第三纪始新世的玉皇顶组和大仓房组；中期的稳定沉降湖盆扩展时期的沉积，即早渐新世的核桃园组沉积；晚期的萎缩期沉积，即晚渐新世的廖庄组沉积。它们构成了粗细粗、红黑红完整的沉积旋回（如图 1-4 所示）。其后地壳上升，直到晚第三纪、上新世第四纪又堆集了几百米以河流相为主的上寺组沉积。

核桃园组是湖盆全盛时期的沉积，发育了一套以深湖相、半深湖相、浅湖相为主的深灰色、灰色泥岩、砂岩、泥质白云岩、白云岩及油页岩，在上部夹有少量天然碱层。该段沉积是盆地的主要生、储油层段。

地 层 层 序				厚 度 (m)	岩 相 组 合
系	统	组	段		
上第三系	上新世	上寺组		270 889	
下第三系	渐新统	廖庄组		0 926	河流 / 泛滥 / 平原 / 相
	始新统	核 桃 园 组	核一段	197 501	浅湖 / 半深湖 / 相
			核二段	0 635	
			核二段 ₂	139 246	
			核二段 ₃	208 300	
			核三段	0 576	
	中始新统	大仓房组		420 1288	河流 / 洪积 / 相
	古新统	玉皇顶组		216	
	白垩系	上白垩统	寺沟组		

图 1-4 泌阳凹陷晚白垩世—第三系地层柱状剖面示意图

这一旋回性的特征在南襄盆地的各个凹陷中具有相似性。但是各个凹陷的主要沉降时期和沉降幅度有差异，其中泌阳凹陷沉降速度最快，沉积厚度最大，核桃园组厚达 3200m，最大沉降阶段是核三段。南阳凹陷次之，最大沉降阶段为核三段末和核二段，核桃园组最厚为 1700m。襄阳、枣阳凹陷沉积厚度最小，最大沉降阶段在核二段中、上部，最大厚度约 1000m。这说明盆地由东向西、由北向南凹陷的幅度变小，主要沉降期逐渐变晚。

在构造上，南阳和泌阳凹陷均为南陡北缓的不对称箕状凹陷。南侧为主断裂控制的陡坡，中央为凹陷区，北侧为平缓斜坡区。南阳、泌阳凹陷的南缘均为断层所限，但南阳凹陷断面平缓，断陷幅度较小，局部时期为超覆接触。而泌阳凹陷为北西向和北东向两组呈弧形连接的强活动的同生断层所控制，断裂活动强度大，断面较陡，最大断距达 8000m 以上，控制了泌阳凹陷的发育。断层下降盘发育滚动背斜，如下二门油田。

南阳、泌阳凹陷的中央部分为深凹陷，泌阳凹陷深达 9000 余米，各个时期的沉降中心与沉积中心基本吻合。凹陷除接受来自北部、西北部、东北部为主的物源供给外，凹陷的南缘也有水下扇的沉积体，直插盆地的中心。由于盆地内沉积中心、沉降中心与生油中心基本一致，加上生、储、盖层配置好，因而聚集了丰富的油气。

已发现双河、下二门、井楼、赵凹、安棚等油田。南阳凹陷中部为一南北向魏岗凸起所插入，将凹陷分为东、西两部，东部凹陷面积大，凹陷深，是主要的生油凹陷，其中已发现魏岗、张店两油田和北马庄含油断块。西部东庄凹陷面积较小，凹陷较浅，目前仅发现东庄油田。

泌阳、南阳凹陷的北部为平缓斜坡带，其上发育了一系列的次一级断层，是盆地内物质来源的主要方向和油气运移的主要指向。目前，已在泌阳凹陷北部斜坡发现了古城、新庄等含油区块，推测这是一个油气十分富集的地区。

在南阳和泌阳凹陷之间为横向的社旗凸起和唐河水下低凸起。在核桃园组沉积时期，两个凹陷虽然为凸起所分割，但有可能湖水连通。因此唐河低凸起也是油气运移指向和油气聚集的有利地带。目前在其东侧已找到了井楼油田和古城油田。

第三节 三水盆地

三水盆地位于珠江三角洲，系加里东褶皱带上发育的一个内陆断陷盆地，面积近 3000km²，呈不规则菱形展布。盆地长轴北北西向，盆地内盖层最大厚度约 3000m。

盆地边界受断裂控制十分明显，边界断裂有西江断裂、虎眠岗—官窑断裂、北江断裂和广州从化断裂。盆地内区域构造单元可以分四个凹陷、三个凸起和一个斜坡带，从西向东坳陷分别为大沙凹陷、宝月凹陷、小塘凹陷和盐步凹陷，凸起为河口凸起、大榄凸起和大沥官山凸起及冯村斜坡带（图 1-5）。盆地内比较完整的局部构造有宝月背斜，沙头圩—马头岭鼻状构造等。

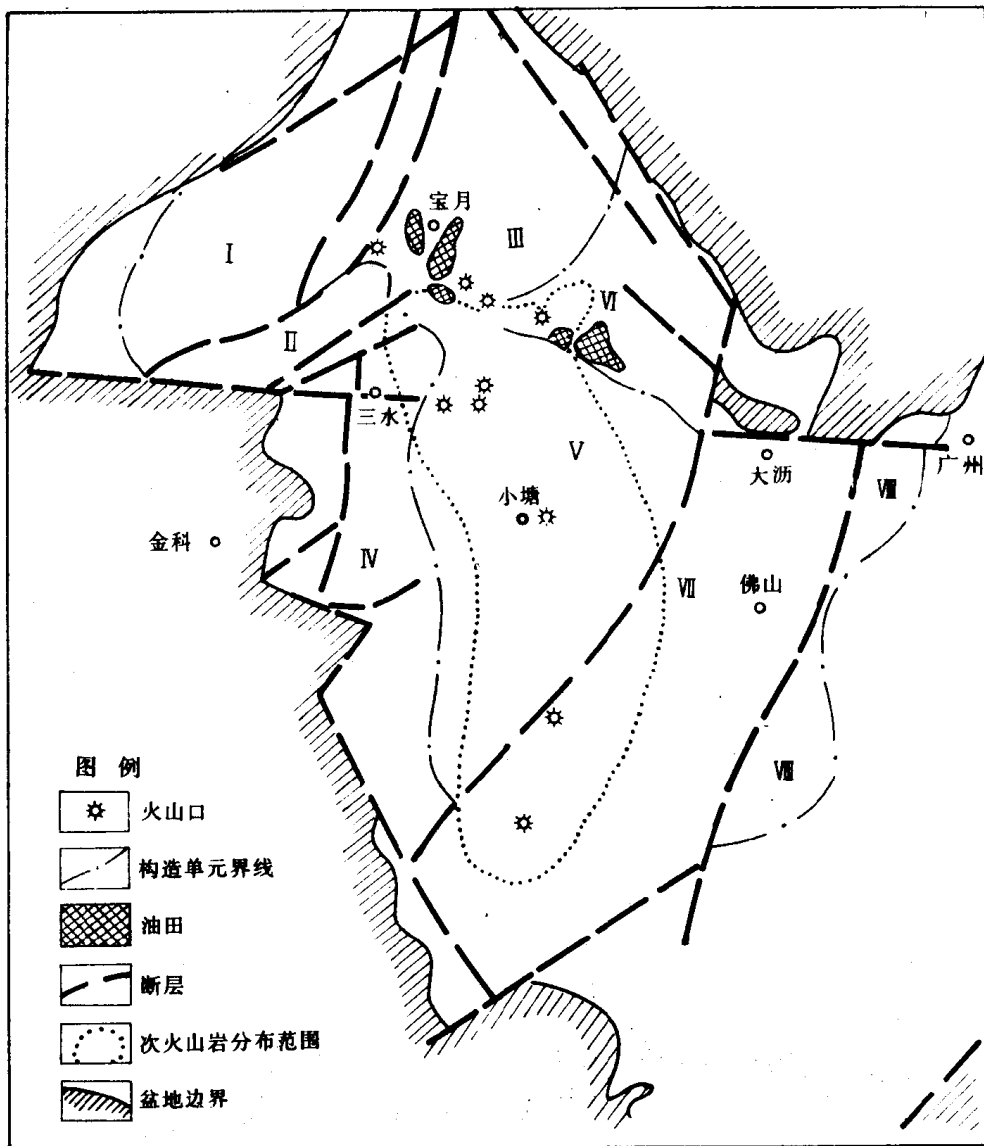


图 1-5 三水盆地早第三纪火山岩分布与构造单元划分图

盆地周边岩层为下古生界浅海相碳酸岩、上古生界砂、页岩和上三叠统一侏罗统碎屑岩，盆地内沉积盖层为白垩—第三系，被划分为 6 个组 14 个段，从下至上依次为白鹤洞组、三水组、大望山组、埤心组、西埤组和华涌组（如表 1-1 所示）。

白垩系一下第三系为一完整的沉积旋回。白垩系一下第三系沉积物粒度由粗变细，颜色由红变暗，埵心组二段—华涌组沉积物粒度由细变粗，颜色由暗变红。盆地减压实类型，系华涌组沉积后地层遭受剥蚀的缘故。

三水盆地生油层为下第三系埵心组二段，储油层为下第三系埵心组三段。三水盆地已发现有宝月油气田，沙头圩—马头岭油气田，均为小油田，目前已由地方开采。此外，还发现纯度极高的 CO_2 气，有极高的民用价值。

表 1-1 三水盆地白垩系一下第三系地层简表

系	统	组	段	岩 性 简 述	厚度(m)
下 第 三 系	E_2-E_3	华涌组	$E_{2-3}h^3$	杂色灰质泥岩夹灰棕色砂砾岩、粗砂岩	>200
			$E_{2-3}h^2$	灰紫色砂砾岩、含砾砂岩、粉细砂岩与火山岩互层	500-900
			$E_{2-3}h^1$	棕红色砂砾岩、粗砂岩与红色粉砂岩、泥岩互层	300-500
	E_2	西埵组	E_2x^2	灰色含砾砂岩与棕色泥质粉砂岩、泥岩互层	200-350
			E_2x^1	灰棕色砂岩、粉砂岩、泥岩互层夹砂质泥岩	100-200
	E_1-E_2	埵心组	$E_{1-2}b^3$	灰黑色泥岩与灰色中、细砂岩互层，上部夹凝灰岩	100-430
			$E_{1-2}b^2$	黑色灰质泥岩夹灰色粉砂岩	100-300
			$E_{1-2}b^{(2)}$	棕红色灰质泥岩夹棕色粉砂岩，普遍含石膏	20-150
			$E_{1-2}b^{(1)}$	灰色砾岩、砂砾岩	50-150
白 垩 系	K_2	大望山组	K_2d	灰色砾岩夹棕红色砂岩	200-600
		三水组	K_2s^2	上部棕色粉砂岩夹灰色泥岩，含石膏，下部暗棕色砂砾岩、砾岩	200-400
			K_2s^1	上部以棕红色粉砂岩为主，下部棕色砂砾岩	300-700
	K_1	白鹤洞组	K_1b	上部深灰色灰质泥岩与棕色粉砂岩互层见石膏，下部褐色砂砾岩	400

第二章 利用声波测井资料研究泥岩压实与孔隙流体压力

第一节 利用声波测井资料计算泥岩孔隙度、流体压力、流体损失量及计算机程序设计

在上覆沉积负荷的作用下，下伏泥质沉积物颗粒之间逐渐紧密，这就是泥岩压实现象。孔隙度是说明泥岩压实程度的主要参数之一，但在一个盆地的研究工作之中，大量地实测孔隙度值是不可能的，须借助各种测井曲线进行间接的计算，其中，声波测井是计算泥岩孔隙度最为有效的手段之一。

在一定地层中，声波测井时差值 Δt 的大小取决于岩石性质、压实固结程度、孔隙度及孔隙中所充填的流体性质。传播声波的这些物质密度越大，声波速度越快， Δt 越小；反之， Δt 越大。因此， Δt 值间接地反映了地层的压实状况和孔隙度。

一、声波时差与孔隙度的关系

声波时差基本上是岩石孔隙度和岩石性质的函数，泥岩成分大致稳定，随着压实程度的增加，孔隙度呈较有规律的变化。Wittie 等人根据实验结果统计推断，固结地层在具有均匀分布的小孔隙的理想条件下，孔隙度与声波时差有下列线性关系：

$$\Delta t = (\Delta t_f - \Delta t_{ma}) \phi + \Delta t_{ma} = \Delta t_f \phi + \Delta t_{ma} (1 - \phi) \quad (2-1)$$

式中： Δt_f ——孔隙中的流体时差值 ($\mu s/m$)； Δt_{ma} ——岩石骨架时差值 ($\mu s/m$)；

ϕ ——岩石孔隙度。

但在实际情况中，地层成分较复杂，可在某一地区对较有代表性的纯泥岩取样，实测 Δt 、 ϕ 值，然后进行线性回归，求取孔隙度和声波时差关系的方程。经过实际取值计算得，黄骅坳陷中区为：

$$\phi = 0.1098\Delta t - 23.155 \quad (2-2)$$

泌阳凹陷为：

$$\phi = 0.1142\Delta t - 23.5261 \quad (2-3)$$

用 (2-2)、(2-3) 式就可算出以上两地区中不同声波时差所对应的孔隙度值。

一般说来，时差—孔隙度方程因地区而异，在同一沉积历史的地区内适用，在另一地区就不一定可靠了，特别是对构造较为复杂的地区，应分别考虑。

利用时差—孔隙度方程计算的结果并不总是可信的，其原因是 Δt 的读值受多种因素的影响， Δt 的真实与否直接影响到 ϕ 值的结果。

在 (2-1) 式中，只考虑了岩石骨架和孔隙中所充填的流体这两种因素。当岩石骨架由两种以上成分组成时，由于这些成分的测井响应值 Δt 互不相同，这样就影响了 Δt 的取值，由此反映的地层压实情况也会出现某些失真现象，现以岩石骨架由两种成分组成时的情况进行讨论。

对于泥岩的 Δt 取值，一般取值为 $205\text{--}548\mu\text{s}/\text{m}$ ，由于岩石骨架固结性较好，在此取 $\Delta t = 205\mu\text{s}/\text{m}$ ，其它常见岩石骨架及流体的 Δt 取值如表 2-1 所示。

较为常见的是泥岩中含有砂质的情况。图 2-1、图 2-2 是分别用杂质校正公式及在 (2-1) 式中对 Δt_{ma} 取泥岩和砂岩加权平均值的方法，作出的砂泥质含量变化对 ϕ 值的影响曲线示意图。当骨架为纯泥岩时， Δt 值减小，即表示压实程度增加， ϕ 值随之变小；当泥岩中含有砂质成分时，结果并非如此。

表 2-1 常见岩石骨架及流体的 Δt 取值

介 质	$\Delta t(\mu\text{s}/\text{m})$	介 质	$\Delta t(\mu\text{s}/\text{m})$
石 油	985—757	泥质砂岩	177
水、泥浆	655—620	白 云 岩	125
粘 土	548—410	灰 岩	156—143
泥 岩	548—205	盐 岩	217—193
砂 岩	168	无水石膏	164—163

在图 2-1 中，骨架为纯泥岩时，取时差值 $\Delta t = 475\mu\text{s}/\text{m}$ ，对应 A 点 $\phi = 60\%$ ；若取 $\Delta t = 469\mu\text{s}/\text{m}$ ，对应 B 点 $\phi = 58.5\%$ ，即 Δt 值降低了 $6\mu\text{s}/\text{m}$ ， ϕ 减少了 1.5% ，压实程度增加。但当泥岩中含有砂质达 20% 时，尽管 Δt 取值未变，对应 C 点仍为 $\phi = 60\%$ 。这说明，在泥岩含有砂质情况下， Δt 读值降低，并不意味着压实程度增加，因为这时 ϕ 值并没有变化。

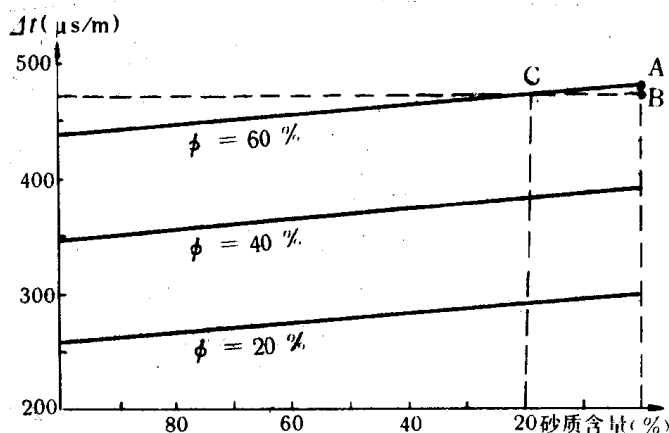


图 2-1 泥岩中砂质含量对 Δt 、 ϕ 值的影响
(根据校正公式)

对 (2-1) 式采用加权平均方法所作的图 2-2、图 2-4，也明显地表现出这种变化特征，只是变化幅度略有不同，但趋势是显然的。至于因方法不同而存在的差异，尚待分析。

由此说明，泥岩中的杂质成分可导致 Δt 值反映的压实程度判断失真，杂质为砂质时引入的误差较小，为白云质时引入的误差较大，因为这是白云质 Δt 取值 ($125\mu\text{s}/\text{m}$) 较砂岩 Δt 取值 ($168\mu\text{s}/\text{m}$) 更低于泥岩 Δt 值 ($205\mu\text{s}/\text{m}$)。即 Δt 取值与泥岩 Δt 相差越大的杂质，其结果对实测的时差值影响越大。因此，根据测井曲线读取 Δt 值时，应尽量选取纯泥岩层段读取，综合利用其它各种测井曲线，剔除非泥岩夹层，特别是象白云质这样的低时差响应值的成分。

同理可以讨论泥岩中含有白云质时， Δt 和 ϕ 的相互变化情况。

在图 2-3 中，白云质的存在对 Δt 的取值影响更为明显。当取 $\Delta t = 502\mu\text{s}/\text{m}$ 时，对应于纯泥岩的 A 点 $\phi = 60\%$ ；若 Δt 值减少至 $490\mu\text{s}/\text{m}$ ，在 B 点有 $\phi = 57.2\%$ ；但在 C 点，尽管 Δt 值从 $502\mu\text{s}/\text{m}$ 降至 $490\mu\text{s}/\text{m}$ ，即减少了 $12\mu\text{s}/\text{m}$ ，但 ϕ 值并没变化，即仍为 $\phi = 60\%$ 。由此看出，白云质含量的增加导致了 Δt 取值减小。

然而, 泥岩中总会夹杂着其它成分的杂质, 只是多少不同而已。在图 2-1 中, 根据分析可以看出, 砂质含量不超过 20% 时, 对 ϕ 造成的误差可控制在 1.5% 的范围内, 这在实际工作中还是允许的。根据对图 2-3 的分析可知, 白云质的含量不足 10%, 对 ϕ 值的计算也是可行的。如用图 2-2、图 2-4, 杂质含量的允许范围还会更大些。

地球物理学家 Faust (1951) 认为, 深度也是确定时差—孔隙度的主要因素之一。在较浅处 (700m 以上) 引入的误差较大, 从实用观点看, 较深处用声波测井确定孔隙度效果会更好些。

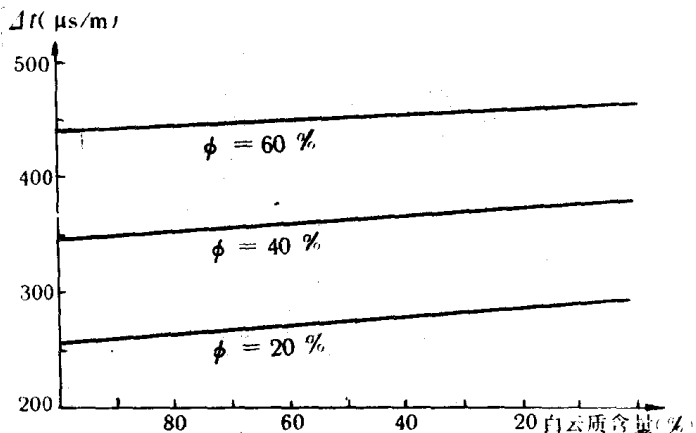


图 2-2 泥岩中砂质含量对 Δt 、 ϕ 值的影响
(根据 (2-1) 式加权)

二、流体压力与声波时差的关系

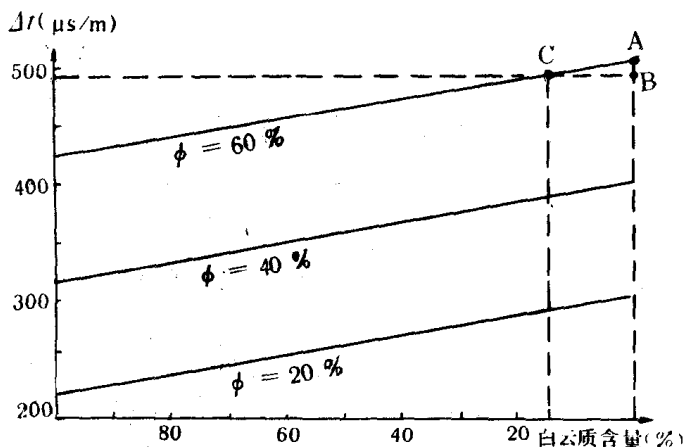


图 2-3 泥岩中白云质含量对 Δt 、 ϕ 值的影响
(根据校正公式)

式中: $\Delta t' = \ln(\Delta t)$; A、B——待定常数。

(2-5) 式即为正常压实趋势直线方程, 当 A、B 确定后, 该方程就可确定。

通常 A、B 是根据不同的 Z 和所对应的实测 Δt 的自然对数值用线性回归方法求得。图 2-5 为一实例。在该图中, 先判断欠压实带的上界深度 Z_0 的值, 然后对 Z_0 以上的实测值 Z_i 、 Δt_i ($i=1, 2, 3 \dots N$) 用下式分别计算:

$$B = \frac{N \sum_{i=1}^N Z_i \Delta t_i' - \sum_{i=1}^N Z_i \Delta t_i' \sum_{i=1}^N \Delta t_i'}{N \sum_{i=1}^N Z_i^2 - (\sum_{i=1}^N Z_i)^2} \quad (2-6)$$

(一) 正常压实趋势方程的建立

正常压实趋势方程反映了在正常压实状态下, 泥岩的压实随深度的变化情况, 实际上是计算流体压力的基础。所以它对流体压力的计算至关重要。

在正常情况下, 声波时差 Δt 与深度 Z 有下面的指数关系:

$$\Delta t = \Delta t_0 C^Z \quad (2-4)$$

式中: Δt_0 ——外推的地表时差值;

C——正常压实趋势线斜率。

用半对数坐标作图, (2-4) 式可化为如下直线方程:

$$\Delta t' = A + BZ \quad (2-5)$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t'_i - B \sum_{i=1}^N Z_i}{N} \quad (2-7)$$

式中: N ——回归点个数; $\Delta t'_i$ ——实测 Δt 的自然对数值。

从图 2-5 可看出, 正常压实趋势线较好地拟合了正常压实带的 $\Delta t'$ 值。在 Z_0 以下, $\Delta t'$ 逐渐偏离了这条正常压实线。这说明该处出现欠压实情况, 偏离的幅度越大, 欠压实程度越高。

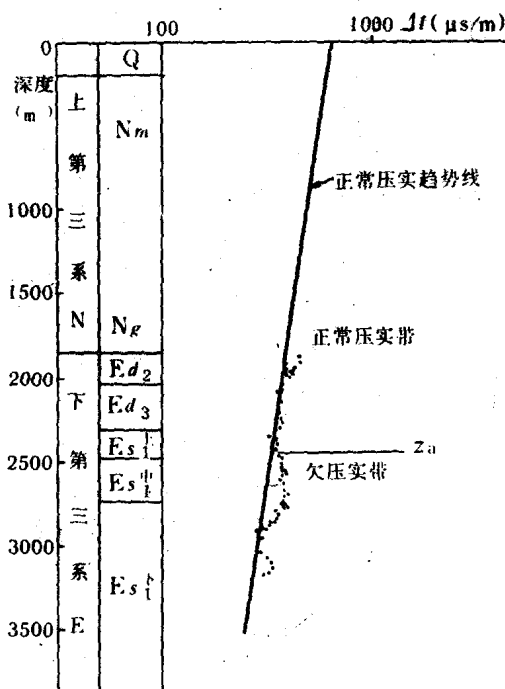


图 2-5 板 11 井压实曲线特征

在正常压实带, 孔隙中流体压力即为静水压力, 其表达式为:

$$P = r_w \cdot Z \quad (2-8)$$

式中: P ——流体静压力 (kg/cm^2); r_w ——地层水密度 (kg/cm^3); Z ——地层埋深。

在欠压实带, 由于产生了异常压力, 流体压力不能再用 (2-8) 式计算了, 可用

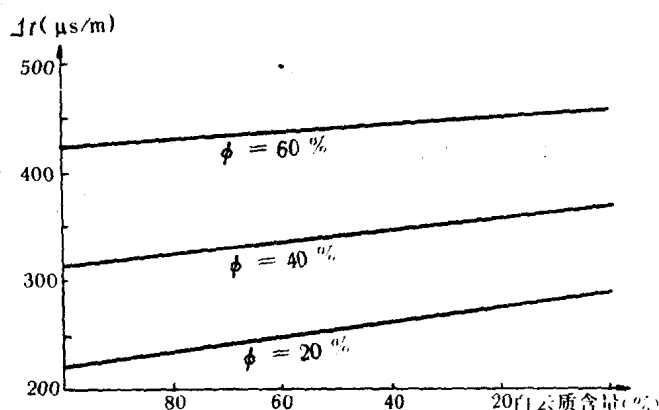


图 2-4 泥岩中白云质含量对 Δt , ϕ 值的影响
(根据 (2-1) 式加权)

由 (2-6) 式确定的直线斜率 B , 通常与盆地的沉降速度有关, 沉降速度较快时, 页岩颗粒本身没有足够的时间去排列, 地层中的流体不能及时排出, 结果压实程度降低, 孔隙度较高, 表现为斜率 B 偏大。在这种情况下, 容易出现欠压实, 产生异常流体压力。反之, 沉降速度慢时, 地层在逐步压实过程中, 将孔隙中的流体慢慢排出, 岩石致密程度变好, 这时 B 值也相应偏小。

确定 B 值时, Z_0 的取值较为重要, 它应能较合理地划分开正常压实带和欠压实带。一般 B 的取值较小 (10^{-4} 左右), 且在计算流体压力时作为分母使用。因此, B 值的好坏, 对流体压力计算影响颇大, 在实际计算中应尤为注意。

(二) 孔隙流体压力的计算

了解地下流体压力分布, 确定异常压力区域、范围、程度, 对认识地下油气运移规律是有益的。下面利用声波测井值计算流体压力。