

# 油气成藏

## 综合研究方法 with 实例

YOUQI CHENG CANG ZONGHE YANJIU FANGFA YU SHILI

黄志龙 高 岗 柳 波 等著



石油工业出版社

# 油气成藏综合研究方法 with 实例

黄志龙 高 岗 柳 波 等著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

油气成藏研究主要涉及油气成藏的各个要素及其相互之间的时空配置关系,包括有效烃源岩的分布及源储关系配置、油气来源与运移追踪、油气输导条件、盖层及其保存条件、油气藏形成与演化、油气藏形成的主控因素等方面。因此,油气成藏研究是在综合相关基础学科与专门学科研究成果的基础上,应用现代勘探方法与技术来动态分析油气藏的形成过程与模式,揭示油气分布规律,为进一步勘探决策提供科学依据。本书系统地介绍了有效烃源岩评价与油气源追踪、油气运移、成藏史和成藏模式的研究方法与实例,以及非常规油气藏的研究思路和方法。

本书主要作为高等院校油气地质专业硕士和博士研究生的教学参考书,也可供相关专业的研究生和从事石油勘探与开发工作的技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

油气成藏综合研究方法 with 实例/黄志龙等著.  
北京:石油工业出版社,2016.1  
ISBN 978-7-5183-1157-6

- I. 油…
- II. 黄…
- III. 油气藏形成-综合研究
- IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 038022 号

---

出版发行:石油工业出版社  
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)  
网 址:www.petro. pub. com  
编辑部:(010) 64523543  
图书营销中心:(010) 64523633

经 销:全国新华书店  
印 刷:保定彩虹印刷有限公司

---

2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷  
787×1092 毫米 开本:1/16 印张:21.25  
字数:540 千字

---

定价:100.00 元  
(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)  
版权所有,翻印必究

# 前 言

油气成藏研究是石油地质学的核心研究内容，它涉及油气成藏的各个要素及其相互之间的作用与时空配置关系。具体包括有效烃源岩的分布及源储关系配置、油气来源与运移追踪、油气输导条件、盖层及其保存条件、油气藏形成与演化、油气藏形成的主控因素等方面。每个成藏要素对油气藏的形成都是不可或缺的，但具体到一个盆地或构造带，油气成藏的关键要素是不尽相同的，油气成藏研究的切入点也就不同。

油气成藏研究是油气勘探研究中的难点之一，涉及领域很广，主要包括构造地质学、地层学、岩石学、矿物学、地球化学（特别是有机地球化学）、油藏地质学、油田水文地质学与油藏工程学等学科。由于油气勘探本身是一项综合性很强的复杂系统工程，在科学技术飞速发展的今天，石油地质勘探越来越需要对地质、地球物理、有机地球化学、油藏工程、钻井、完井等各项资料加以综合分析与研究。因此，油气成藏研究不仅要综合相关基础学科与专门学科的分析研究成果，而且更重要的是，要应用现代勘探方法与技术来动态分析油气藏的形成过程与模式，揭示油气分布规律，为进一步勘探决策提供科学依据。

本书编写的总体思路是以常规油气的“源—输导—油气藏”或非常规油气的“源—储—油气藏”为主线，以解决问题的思路和方法为重点，系统介绍有效烃源岩评价与油气源追踪、油气运移、成藏史和成藏模式的研究方法与实例，以及非常规油气藏研究的一般思路和方法。本书主要读者是大专院校的研究生和从事油气成藏研究的工程师，因此，内容设置上注重以下几个问题：

（1）在介绍基本原理和方法的基础上，结合实例分析油气藏成藏要素及其配置关系。油气藏的形成不能缺少生、储、盖、圈、运、保等要素，更需要这些要素良好的时空配置。因此，成藏要素的研究是油气成藏综合研究的基础，这些要素的静态研究容易理解和掌握，但要素的作用过程与动态配置关系的研究难度就较大。为了便于理解和掌握地质要素及其动态配置条件研究的方法，本书在介绍基本原理与方法的同时，特别选择比较完整和具有针对性的研究实例，以便读者更好地理解 and 掌握研究方法的适用条件。

（2）重点介绍油气成藏问题的研究思路、强调梳理解决问题的切入点和关

键点。油气成藏综合研究的关键是找准问题、理清思路，但很多情况下，主要问题是找不到问题，或者找不到解决问题的切入点和关键点。本书试图通过实例分析，探究和梳理相关问题的研究思路，明确解决问题的切入点和关键点。

(3) 介绍解决油气地质问题所需关键图件的内容和编制方法。石油地质综合研究与其他地质学方法类似，图件和数据表格是常用的表示方法。图件的表示方法是表述问题的关键。尽管油气勘探和综合研究相关图件有一定的规范，但这些规范的图件表示方法不能千篇一律地应用到所有地区和所有问题中。本书在介绍常规图件编制的同时，也对一些特殊问题和特殊图件的运用进行了介绍，便于读者参考。

本书内容主要包括四大方面：①有效烃源岩和油气源追踪的研究方法与实例；②油气运移和成藏史研究方法 with 实例；③油气成藏主控因素、成藏模式研究方法 with 实例；④非常规油气藏的研究方法与实例。本书编写的目的是帮助研究生及相关地质研究工作者理解油气成藏研究的基本思路，了解油气成藏研究的主要方法，使之更好地理解 and 掌握现代油气地质理论，为油气勘探研究 with 综合评价奠定基础。

本书由黄志龙、高岗、柳波、郭小波、马剑编写，其中第一、第二章由高岗、马剑执笔，第三、第五章由黄志龙执笔，第四章由柳波、马剑执笔，第六章由黄志龙、柳波执笔，第七章第一节由黄志龙执笔、第二节由郭小波执笔、第三节由柳波执笔、第四节由高岗执笔。吴红烛参加了部分章节的编写工作。

由于作者水平有限，书中难免存在不足，望读者批评指正。

# 目 录

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| 第一章 有效烃源岩及其控藏作用研究方法 with 实例 .....  | (1)  |
| 第一节 有效烃源岩的识别与评价 .....              | (1)  |
| 一、有效烃源岩的概念 .....                   | (1)  |
| 二、确定有效烃源岩的依据 .....                 | (1)  |
| 三、有效烃源岩有机质丰度下限值的确定方法 .....         | (2)  |
| 第二节 烃源岩 TOC 测井评价方法 .....           | (3)  |
| 一、地层物理模型 .....                     | (4)  |
| 二、烃源岩 TOC 含量测井预测的基本原理 .....        | (4)  |
| 三、烃源岩 TOC 含量估算步骤 .....             | (7)  |
| 第三节 有效烃源岩分布预测方法 .....              | (7)  |
| 一、单井烃源岩有机质丰度与沉积相分析 .....           | (7)  |
| 二、单井相—地震相确定沉积相平面分布 .....           | (9)  |
| 三、烃源岩厚度与成熟度分布的确定 .....             | (10) |
| 四、有效烃源岩厚度分布预测 .....                | (11) |
| 第四节 海安凹陷孙家洼次凹有效烃源岩与控油气作用研究实例 ..... | (12) |
| 一、研究现状、存在问题与研究思路 .....             | (12) |
| 二、烃源岩特征及综合评价 .....                 | (16) |
| 三、有效烃源岩分布预测 .....                  | (28) |
| 四、有效烃源岩的控藏作用 .....                 | (35) |
| 第二章 油气源对比方法 with 研究实例 .....        | (40) |
| 第一节 油源对比方法 .....                   | (40) |
| 一、原油类型划分 .....                     | (40) |
| 二、油源对比方法 .....                     | (48) |
| 第二节 气源对比方法 .....                   | (55) |
| 一、天然气类型划分与判别方法 .....               | (55) |
| 二、气源对比方法 .....                     | (65) |
| 三、油气源对比应注意的问题 .....                | (70) |
| 第三节 三塘湖盆地马朗凹陷石炭系油源对比研究实例 .....     | (71) |
| 一、研究现状与研究内容 .....                  | (71) |
| 二、原油类型与油源对比 .....                  | (73) |
| 第三章 油气运移研究方法 with 实例 .....         | (77) |
| 第一节 油气输导体系的研究方法 .....              | (77) |
| 一、输导层与输导体系 .....                   | (77) |
| 二、输导体系研究方法 .....                   | (80) |

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 三、油气运移剖面图 .....                     | (90)  |
| 第二节 运移方向的地球化学示踪 .....               | (92)  |
| 一、石油运移方向的地球化学示踪 .....               | (92)  |
| 二、天然气运移方向的地球化学示踪 .....              | (96)  |
| 第三节 吐哈盆地台北凹陷西部弧形构造带油气运移规律研究实例 ..... | (98)  |
| 一、研究现状、存在问题与研究思路 .....              | (99)  |
| 二、西部弧形构造带油气运聚特征 .....               | (101) |
| 第四章 油气藏保存条件研究方法 with 实例 .....       | (109) |
| 第一节 油气保存条件研究方法 .....                | (109) |
| 一、盖层封闭条件研究方法 .....                  | (109) |
| 二、断层封闭性研究方法 .....                   | (120) |
| 三、地层水性质与油气藏保存关系 .....               | (127) |
| 第二节 宝岛北坡断层封闭性与油气运聚关系研究实例 .....      | (130) |
| 一、研究现状、存在问题与研究思路 .....              | (130) |
| 二、宝岛北坡断层封闭性 .....                   | (132) |
| 三、成藏特征 .....                        | (141) |
| 第五章 古构造演化与成藏史研究方法 with 实例 .....     | (147) |
| 第一节 油气成藏期研究方法 .....                 | (147) |
| 一、地质分析法 .....                       | (147) |
| 二、储层地球化学方法 .....                    | (150) |
| 三、热史与生烃史研究方法 .....                  | (152) |
| 第二节 古构造及油气成藏史恢复方法 .....             | (156) |
| 一、地层剥蚀厚度与埋藏史恢复方法 .....              | (156) |
| 二、古构造的恢复方法 .....                    | (164) |
| 三、构造演化史与成藏史的恢复方法 .....              | (165) |
| 第三节 准噶尔盆地红旗坝地区古构造与油气成藏研究实例 .....    | (167) |
| 一、研究现状、存在问题与研究思路 .....              | (167) |
| 二、红旗坝地区成藏条件 .....                   | (169) |
| 三、古构造特征与油气古运移格局 .....               | (178) |
| 四、勘探潜力与有利区带分析 .....                 | (180) |
| 第六章 油气成藏主控因素与成藏模式研究方法 with 实例 ..... | (182) |
| 第一节 油气成藏解剖方法 .....                  | (182) |
| 一、静态地质要素解剖 .....                    | (182) |
| 二、动态地质过程分析 .....                    | (183) |
| 三、失利圈闭或失利井分析 .....                  | (191) |
| 第二节 成藏主控因素研究方法 .....                | (193) |
| 一、油气成藏条件主要研究内容与方法 .....             | (194) |
| 二、油气成藏主控因素分析方法 .....                | (195) |
| 三、油气分布规律的研究方法 .....                 | (200) |
| 第三节 成藏模式研究方法 .....                  | (201) |

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 一、成藏模式概念 .....                      | (201) |
| 二、成藏模式的分类 .....                     | (202) |
| 三、成藏模式的建立方法 .....                   | (203) |
| 四、有利区预测方法 .....                     | (209) |
| 第四节 吐哈盆地台南凹陷油气成藏综合研究实例 .....        | (209) |
| 一、研究现状、存在问题与研究思路 .....              | (209) |
| 二、油气成藏地质条件 .....                    | (211) |
| 三、油气成藏史 .....                       | (219) |
| 四、油气成藏主控因素及有利区带预测 .....             | (223) |
| <b>第七章 非常规油气藏研究方法 with 实例</b> ..... | (231) |
| 第一节 非常规油气藏特征与形成条件 .....             | (231) |
| 一、非常规油气藏概念和类型 .....                 | (231) |
| 二、非常规油气藏形成条件 .....                  | (235) |
| 第二节 非常规油气藏储层研究方法 .....              | (245) |
| 一、致密砂岩储层研究方法 .....                  | (245) |
| 二、页岩储层研究方法 .....                    | (255) |
| 第三节 非常规油气藏地质评价方法 .....              | (265) |
| 一、地质评价方法 .....                      | (265) |
| 二、资源评价方法 .....                      | (271) |
| 第四节 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷致密油藏研究实例 .....       | (282) |
| 一、地质概况、存在问题与研究思路 .....              | (282) |
| 二、致密油基本地质特征 .....                   | (284) |
| 三、致密油运聚模式 .....                     | (289) |
| 四、致密油资源评价 .....                     | (290) |
| <b>参考文献</b> .....                   | (303) |
| <b>彩色附图</b> .....                   | (318) |

# 第一章 有效烃源岩及其控藏作用研究方法 with 实例

烃源岩是油气生成、运聚与成藏的基础。烃源岩评价主要包括有机地球化学评价与地质评价两个方面。本章在介绍有效烃源岩识别、有机碳测井评价的基础上，提出有效烃源岩分布及其控藏作用的研究方法，最后介绍有效烃源岩预测的实例。

## 第一节 有效烃源岩的识别与评价

烃源岩有机质丰度评价主要依据有机碳含量、氯仿沥青“A”含量、总烃含量和热解  $S_1 + S_2$  绝对值，由于烃源岩与非烃源岩的有机质丰度界限值很难与排烃相联系，因而难以表明排烃特征，只能评价烃源岩优劣，由此难以评价其有效性。

### 一、有效烃源岩的概念

有效烃源岩是指能够生成并排出烃类而形成工业油气藏的烃源岩（Hunt J M, 1978; 金强等, 2001），有效烃源岩是油气藏形成的第一地质条件（柳广第等, 2009; 刘联群等, 2010），但烃源岩的有效性一直是烃源岩评价的难点（李志明等, 2010）。

烃源岩有效性的最直接证据实际就是油气源对比（Tissot B P 等, 1978; Peters K E 等, 1994; 刘四兵等, 2006），将工业性油气田的油气与不同烃源岩进行对比，具有亲缘关系的烃源岩就是有效烃源岩（详见第二章）。

### 二、确定有效烃源岩的依据

油气源对比只是定性确定了有效烃源岩，难以作出定量评价。油气源对比时往往也仅选择少量的烃源岩进行对比，而在纵向上，烃源岩的非均质性非常强，沉积环境、有机质丰度、类型和成熟度都有很大变化，这给有效烃源岩的确定带来了很大困难。烃源岩能否排烃是形成工业性油气藏的基础，与有机质丰度、类型和成熟度均有密切关系。作为有效烃源岩的最低要求是有排烃发生，确定有效烃源岩正好排烃时对应的有机质特征就成为判断有效烃源岩的主要依据。一般地，对于一套烃源岩来说，有机质类型可能大体接近，生烃量就主要与有机质丰度和成熟度有关，此时成熟度就成为能否生烃的关键。一般成熟度越高，生烃量越大。当某套烃源岩达到一定成熟阶段时，能否大量生烃又主要取决于有机质丰度。由于烃源岩总是要吸附一部分所生成的烃类，只有生烃量大于吸附量，多余的烃类才会从烃源岩中排出，所以，此时如果有有机质丰度太低，生烃量不足以满足烃源岩的饱和吸附，就不会有烃类排出，这就要求有机质丰度达到一定的最低标准，这就是所谓的有机质丰度下限值，也是有效烃源岩确定的关键。在有机质丰度的各种参数中，有机碳含量代表了烃源岩中有机质的总体含量大小，所以，主要采用有机碳含量下限值确定有效烃源岩。

国内外学者都提出过有机碳含量的下限值。Hunt J M（1978）认为 TOC 含量下限值为

0.4%；Jones（1984）根据世界上大多数重要油藏都产自 TOC 含量  $\geq 2.5\%$  的烃源岩而认为该下限值为 2.5%；Momper（1984）、Mc Auliffe（1984）、Barker（1984）等学者大多倾向于 TOC 含量  $\geq 1.0\%$ ，低于此值即难以排烃。目前国内外学者对泥岩类烃源岩有机碳含量下限值的认识较为一致，一般以 0.4%~0.5% 作为下限值，也有更高值的（饶丹等，2003；梁狄刚，1999；梁狄刚等，2000）；碳酸盐岩有效烃源岩有机碳含量下限值则分歧较大（郝石生等，1996），但目前也趋于认为与泥岩相近或一致。饶丹等（2003）根据国内外已知油气田（藏）的有效烃源岩统计数据，结合烃源岩成熟度参数，提出了不同岩性有效烃源岩 TOC 含量评价标准（石灰岩有机碳含量  $\geq 0.3\%$ ；泥灰岩有机碳含量  $\geq 0.5\%$ ；泥岩有机碳含量  $\geq 1.0\%$ ），并指出油源岩成熟度上限指标  $R_o \leq 1.5\%$ ；气源岩成熟度上限指标  $R_o \leq 4.0\%$ 。

由此可见，已有的 TOC 下限值都是基于统计学得出的，与研究区有很大关系，各下限值均不具备普遍适用的意义。事实上，不同地区、不同层位的烃源岩在岩性、厚度、有机质类型等方面有很大差异，不可能用统一的下限值对不同的盆地、不同层位的有效烃源岩进行评价，但已有下限值的认识可作为重要参考。

实际上，各盆地的勘探程度不同，烃源岩的资料程度不同，统一的下限值难以适用。为此在确定有效烃源岩时，首先应考虑盆地的勘探程度，然后考虑已发现油气和烃源岩的资料程度。

对于低勘探程度的盆地，由于还没有油气发现，自然有效烃源岩在理论上就不可能确定，此时主要是针对潜在烃源岩的认识，各种可能富有机质岩石都可能成为潜在烃源岩，明确这些潜在烃源岩的分布是进一步油气勘探的关键。对于中、高勘探程度的盆地，已经发现了油气，有效烃源岩就可以直接通过油气源对比进行确认，进而充分考虑烃源岩的具体地质特征和生排烃特征确定有效烃源岩的有机质丰度下限值，由此确定有效烃源岩的精细分布。

### 三、有效烃源岩有机质丰度下限值的确定方法

对较高勘探程度盆地确定烃源岩有效性时，必须同时考虑 TOC 含量、残留烃含量和生烃转化率特征。高岗等（2012）根据鄂尔多斯盆地陇东地区上三叠统延长组湖相暗色泥岩 TOC 含量与生烃转化率（氯仿沥青“A”/TOC，%； $S_1$ /TOC，mg/g）的关系建立了确定湖相有效烃源岩 TOC 下限值的方法；之后应用于酒泉盆地营尔凹陷下白垩统、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组，效果良好（高岗等，2013；匡立春等，2014）。

一般情况下，烃源岩的有机质主要由固态干酪根和可溶有机质组成，烃源岩中残留的可溶有机质即是烃源岩已经生成的烃。如果未发生过排烃，则烃源岩中的残留可溶有机质即为其生成的烃，相当于烃源岩的已生烃量。但如果烃源岩发生过排烃，则其中的残留可溶有机质即为排烃后残留的烃，已生成的烃量由残留烃量和排出的烃量两部分组成。一般所测试烃源岩中的可溶有机质是残留烃。可见，对于同一套烃源岩来说，如果烃源岩有机质类型、成熟度接近，并且未发生过排烃，则有机碳（TOC）含量与已生烃量之间应该具有较好的线性相关关系（图 1-1）。烃源岩生成的烃要排出烃源岩的基本条件应该是必须满足饱和吸附量（霍秋立等，2012；祝厚勤等，2008）。对于同一套各种特征接近的烃源岩来说，饱和吸附烃量应该在一个小范围内变化。而一定烃源岩的已生烃量与有机碳含量具有正相关关系，随有机碳含量增加，已生烃量也增加，但有机碳含量增加到一定值后，对应的已生烃量将满足饱和吸附，多余的烃将排出烃源岩，这样在有机碳含量与已生烃量关系图中（图 1-1），残留烃量的变化线将偏离正常的相关趋势线，随有机碳含量增加，高于饱和吸附的烃量会不断

增加，导致残留烃量不断偏离正常趋势线，残留烃含量变化拐点对应的有机碳（TOC）含量即相当于有效烃源岩的有机碳含量下限值（图 1-1）。

在烃源岩各种有机地球化学分析方法中，热解（Rock-Eval） $S_1$  一般代表烃源岩中已经生成的残留烃量，在未发生排烃的烃源岩中， $S_1$  可以近似代表已生烃量；通过氯仿抽提得到的氯仿沥青“ $A$ ”含量是直接代表烃源岩中残留烃的参数，在未发生排烃时也可以代表已生烃量。

基于上述分析，烃源岩有机碳（TOC）含量与热解  $S_1$ 、氯仿沥青“ $A$ ”含量的关系即可确定有效烃源岩有机碳含量下限值（图 1-2）。例如，阿尔凹陷和乌里雅斯太凹陷有机碳含量高于 2.5% 的烃源岩才可以大量排烃，因此有效烃源岩标准为有机碳含量高于 2.5%；额仁淖尔凹陷和赛汉塔拉凹陷腾一段有机碳含量大于 1.5% 的烃源岩可以大量排烃，有效烃源岩标准为有机碳含量高于 1.5%；吉尔嘎朗图凹陷和洪浩尔舒特凹陷腾一段有机碳含量大于 2% 的烃源岩才可以大量排烃，其有效烃源岩有机质丰度下限为有机碳含量高于 2%。上述凹陷腾一段有效烃源岩有机质丰度下限的差别与各凹陷烃源岩有机质类型与烃源岩层系的岩性组合等因素有关（赵贤正，柳广弟等，2015）。

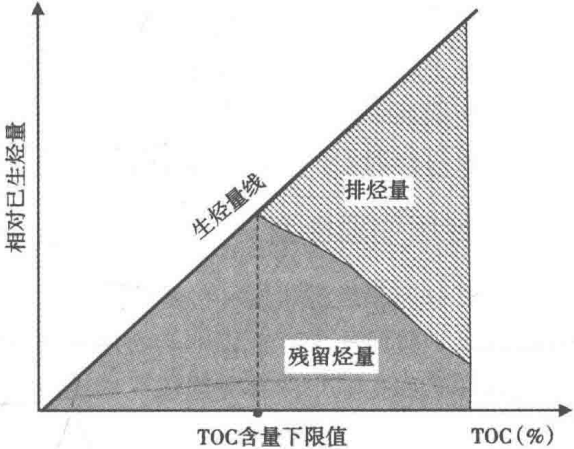


图 1-1 有效烃源岩排烃有机碳含量下限判别模式图（据高岗等，2013）

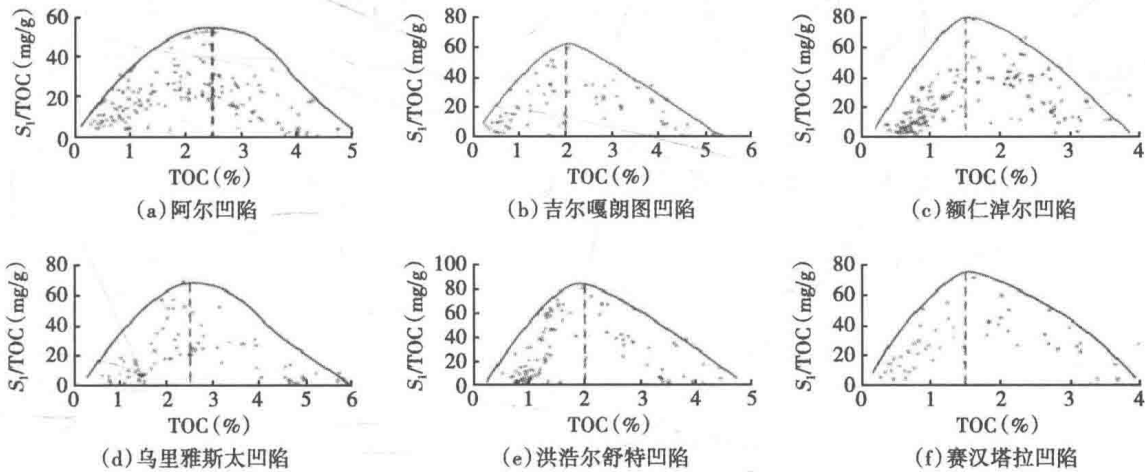


图 1-2 二连盆地腾格尔组一段烃源岩有机碳含量与烃指数关系（据赵贤正，柳广弟等，2015）

## 第二节 烃源岩 TOC 测井评价方法

烃源岩分布往往有一定的非均质性，钻井取心总是有限的，这样，取心段泥岩的有机碳含量数据就有限，大量的未取心段虽然可以通过岩屑进行分析，但由于岩屑往往代表的是某一深度段的综合岩性，其分析结果不如岩心具有代表性。如果整个研究区都通过实验分析进行有机碳含量测定，那么，分析样品数量将会非常庞大，仍难以获得连续井段的有机碳

(TOC) 含量数据。这样就往往用有限的样品分析数据平均值代表整段烃源岩的有机碳含量, 而不同层段有机碳分析样品量的不同往往使得平均值难以反映烃源岩的实际有机质含量, 这必将对烃源岩有机质丰度评价和生烃量的估算结果产生重要影响。

测井数据具有连续分布的特点, 正常情况下, 烃源岩有机质含量越高, 某些测井曲线上的异常就越强, 因此, 可以通过测井异常值反算出有机质含量进行有机质丰度预测。

### 一、地层物理模型

地层可分为非烃源岩层和烃源岩层两大类, 其中烃源岩层又可分为成熟烃源岩层和非成熟烃源岩层。假设富含有机碳的岩石由三部分组成: 岩石骨架、有机质和孔隙水。非烃源岩仅由岩石骨架和孔隙水两部分组成。未成熟烃源岩的固体部分包括固体有机质和岩石骨架, 地层水和少量液态烃充填孔隙空间。成熟烃源岩的固体部分包括固体有机质和岩石骨架, 地层水和较多的液态烃充填孔隙空间 (图 1-3)。烃源岩模型的上述特征是利用测井曲线求取 TOC 含量的岩石学基础。

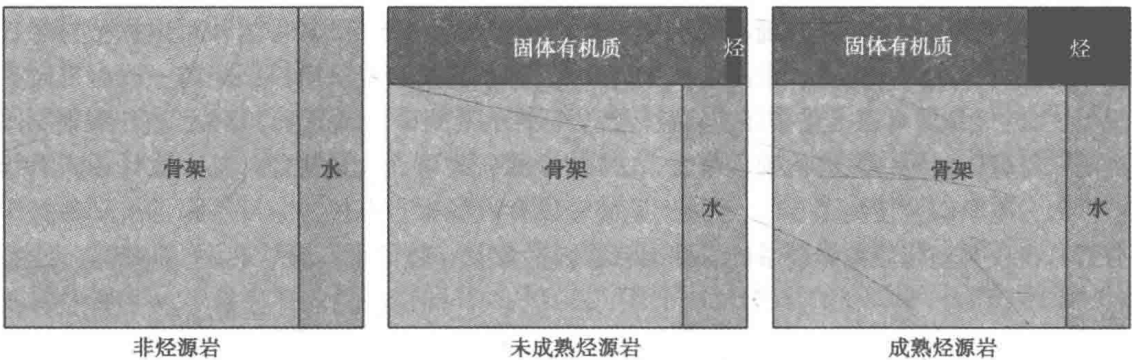


图 1-3 地层体积模型

### 二、烃源岩 TOC 含量测井预测的基本原理

一般情况下, 砂泥岩在声波时差、自然伽马、电阻率、自然伽马能谱测井、密度测井曲线上均表现出不同的特征 (王贵文等, 2002)。通常, 泥岩的声波时差随埋深增加而减小, 但当含有机质时, 由于有机质密度小于岩石骨架, 就会造成地层声波时差增大, 同时在密度曲线上表现为低值; 又由于烃源岩层一般富含放射性元素, 而在自然伽马曲线和能谱测井曲线上表现为异常高; 成熟的烃源岩层由于油气生成, 在电阻率曲线上表现为异常高。所以, 烃源岩在测井曲线上常常表现为“五高一低”即高中子、高声波时差、高电阻率 (高于围岩泥岩)、高自然伽马、高铀含量、低密度特征。根据以上测井响应特征, 就可以进行烃源岩识别, 如 C/O 能谱测井估算法 (Herron, 1986; 赵彦超等, 1994)、自然伽马测井估算法 (Mendelson 等, 1985; 陈增智, 1994)、密度测井估算法 (Mallick 等, 1995; Herron 等, 1986)、电阻率重叠法和双孔隙度法等 (赵彦超, 1990, 1994), 单一测井参数的估算往往会产生一定的甚至是较大的误差, 而综合不同测井资料进行有机碳含量估算的可靠性比单一测井资料要高, 声波测井与电阻率测井重叠估算法 (Burnham 等, 1987) 是较好的一种综合方法。另外, 也有人在探讨通过核磁共振等其他测井方法预测烃源岩有机碳含量 (Alixant 等, 1998)。可见, 通过测井资料预测有机碳含量有各种不同的方法, 但电阻率和声波时差

相结合来进行有机碳含量预测是目前采用较多的方法，在国外许多海相盆地和我国东部中、新生代盆地中都不同程度地得到了应用，效果相对较好（张小莉等，1998；王方雄等，2002；高岗等，2012）。

其基本原理是高分子碳含量可能引起声波时差增高，电阻率的升高又可能指示烃源岩开始成熟并生成烃类流体。在应用方法上，采用特殊比例的电阻率测井曲线和声波测井曲线叠合法来实现烃源岩的识别与有机碳含量的计算。

电阻率曲线采用对数坐标，声波时差曲线采用算术坐标，两者的坐标方向相反。坐标轴刻度比例尺关系为：电阻率每 2 个数量级（如 1~100 Ω·m）严格对应于声波时差的间隔为 328 μs/m（100 μs/ft）。结合自然伽马曲线特征，划分出渗透性岩层与非渗透性岩层。

当两条曲线在一定深度范围内“一致”或完全重叠时为基线（图 1-4），基线的确定最为关键。基线井段对应于非烃源岩段，电阻率和声波时差皆最小。由于电阻率曲线采用对数坐标，水平方向移动时，刻度不方便把握。故一般采取的做法是固定其左右端点值，水平方向移动声波时差曲线来实现两条曲线的重叠。值得注意的是，移动声波时差曲线时，应整体移动，保持左右端点处的刻度区间长度不变，使得电阻率每 2 个数量级对应于声波时差的间隔为 100 μs/ft。

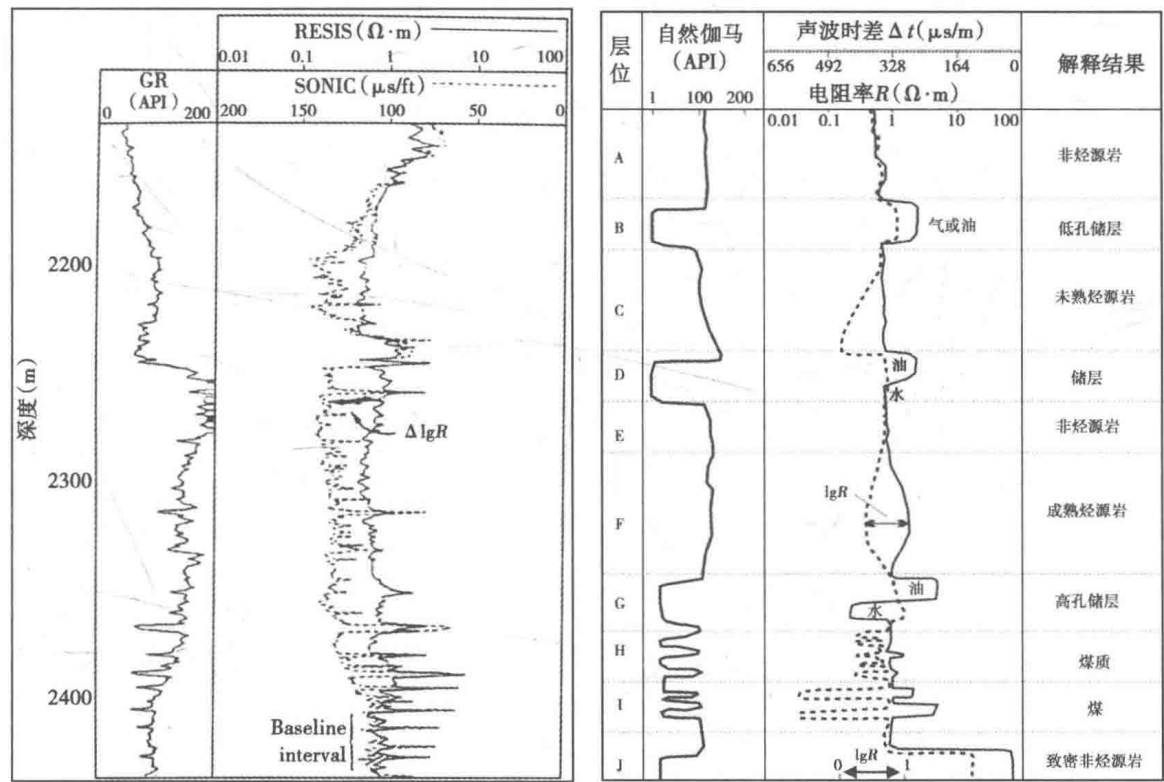


图 1-4 测井预测 TOC 含量示意图

$\Delta \lg R$  法重叠曲线变量如下：

$$\begin{aligned} RT_1 &= \lg (R/R_{\text{基线}}); & DT_2 &= -0.02 (\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \\ \Delta \lg R &= \lg (R/R_{\text{基线}}) + 0.02 (\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) = RT_1 - DT_2 \end{aligned}$$

其中： $R$  为岩石的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )， $\Delta t$  为实测的声波时差 ( $\mu\text{s}/\text{m}$ )， $R_{\text{基线}}$  为相对于  $\Delta t$

基线的电阻率，系数 0.02 基于前面的每 50μs/ft (164μs/m) 的声波时差 Δt 相当于电阻率 RT 的一个对数坐标单位。

当 TOC 含量相同，而成熟度不同时，烃源岩的生烃量不同，R 和 Δt 就会发生变化，从而相同 TOC 对应的 ΔlgR 会不同。所以，在利用上述模型进行 TOC 预测时还应考虑烃源岩成熟度的影响。Passey 等 (1990) 经过大量分析，提出了考虑成熟度的 TOC 含量估算的经验图版 (图 1-5)，建立了相应公式，即： $TOC = (\Delta lgR) \cdot 10^{2.297 - 0.1688LOM}$ 。

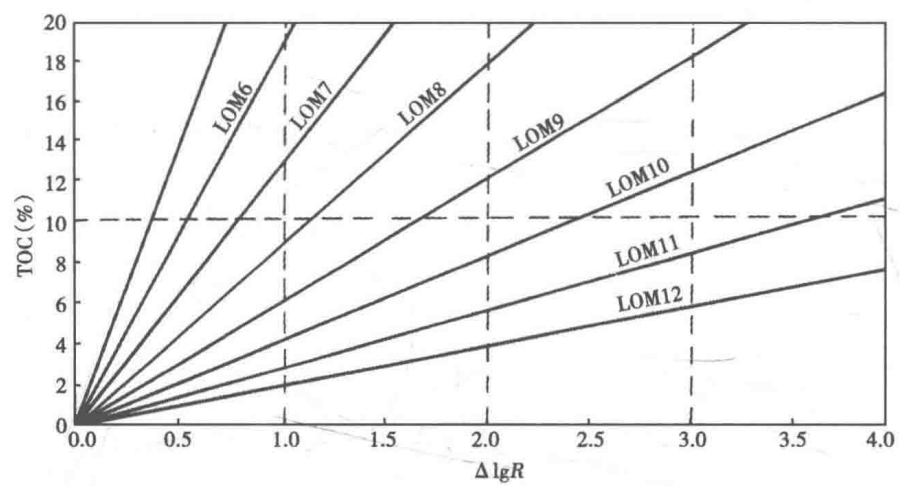


图 1-5 TOC 与 ΔlgR 的关系图 (据 Passey 等, 1990)

按照上述方法估算 TOC 含量后，应与实测 TOC 含量进行对比，对预测结果进行验证 (图 1-6)。只有预测 TOC 与实测 TOC 含量接近时预测才算合理。

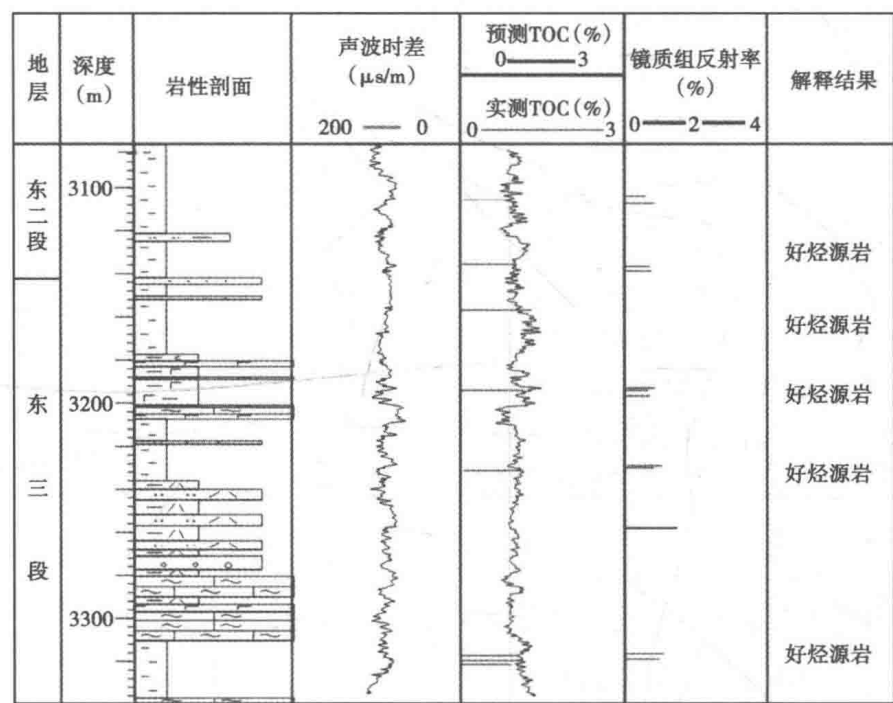


图 1-6 某凹陷单井测井预测 TOC 含量分布图

### 三、烃源岩 TOC 含量估算步骤

$\Delta \lg R$  方法预测烃源岩 TOC 含量的具体步骤可以分为八步。

(1) 选取模型并绘制典型单井柱状图。模型井的选取要求必须有实测 TOC 含量数据、电阻率 ( $R$ ) 和声波时差 ( $\Delta t$ )。单井柱状图包括岩性、实测 TOC 含量数据、电阻率 ( $R$ ) 和声波时差 ( $\Delta t$ ) 等测井曲线和/或其他信息。

(2) 对应声波时差与电阻率测井曲线坐标。这一方法要求声波时差要与电阻率坐标一致, 每  $50 \mu\text{s}/\text{ft}$  ( $164 \mu\text{s}/\text{m}$ ) 相当于电阻率  $R$  的一个对数坐标单位。如 200 个  $\Delta t$  ( $200-150-100-50-0 \mu\text{s}/\text{m}$ ) 对应  $R$  的 4 个对数坐标单位 ( $0.01-0.1-1.0-10-100 \Omega \cdot \text{m}$ )。只有做好坐标对应工作, 才能正确地求出  $\Delta \lg R$ 。

(3) 识别烃源岩与非源岩层。非烃源岩层在自然伽马、电阻率曲线上为正常值, 而烃源岩层则为高值。也可考虑自然电位等其他测井曲线。

(4) 确定基线。正常情况下, 非烃源岩层的声波时差曲线与电阻率曲线重叠, 即为基线位置。若以上两曲线不重叠, 则左右平移其中的一条曲线 (一般平移声波时差曲线), 使两条曲线尽可能重合为止。

(5) 读取基线位置的  $R_{b\text{基线}}$  值和  $\Delta t_{b\text{基线}}$  值。

(6) 计算烃源岩层段实测 TOC 对应的  $\Delta \lg R$ 。分别读取烃源岩层段的  $R$ 、 $\Delta t$  值, 按照公式  $\Delta \lg R = \lg (R/R_{b\text{基线}}) + 0.02 (\Delta t - \Delta t_{b\text{基线}})$  求取  $\Delta \lg R$ 。如果缺声波时差曲线, 也可按下式求取  $\Delta \lg R$ , 即  $\Delta \lg R = \lg (R/R_{b\text{基线}}) + 4.0 (\phi_N - \phi_{N\text{基线}})$  和  $\Delta \lg R = \lg (R/R_{b\text{基线}}) - 2.50 (\rho_b - \rho_{b\text{基线}})$ 。

(7) 绘制实测 TOC 与  $\Delta \lg R$  的关系图, 建立估算 TOC 含量的数学模型。为简化计算, 实际计算时较少考虑烃源岩成熟度因素。利用实测有机碳含量 ( $\text{TOC}_{\text{sc}}$ ) 数据和与之对应的  $\Delta \lg R$  拟合求取有机碳含量 ( $\text{TOC}_{\text{yc}}$ ) 数学模型。首先拟合得到  $\text{TOC}_{\text{sc}} = A \times \Delta \lg R + B$ , 其中  $A$  和  $B$  为系数。得出系数  $A$  和  $B$  后, 再建立预测有机碳含量 ( $\text{TOC}_{\text{yc}}$ ) 数学模型:  $\text{TOC}_{\text{yc}} = A \times \Delta \lg R + B$ 。

(8) 重复步骤 (1) 至 (6), 计算其他钻井没有测试数据的烃源岩层段的 TOC 值。估算时应该注意几点: ①实际上所有页岩都含有一定的有机碳, 而在模型中把非烃源岩段的传播时间和电阻率曲线叠合在一起的基线对应的 TOC 含量当作 0 是不合理的。应根据 TOC 分析结果将 TOC 含量均值与模型估算的 TOC 值相加才能获得实际的 TOC 含量。②在成熟度相近时才可预测 TOC 含量。实际估算时, 可以分地区、分层段进行。③实测 TOC 含量应在预测前进行深度归位。

### 第三节 有效烃源岩分布预测方法

在有效烃源岩有机质丰度下限值确定和单井有机碳含量预测基础上, 钻井与地震相结合是进行盆地有效烃源岩预测的唯一方法。单井主要解决盆地某点的垂向烃源岩沉积相及其对应有机质分布特征。地震主要解决盆地区域上沉积相与有效烃源岩分布特征。可以按照如下步骤进行有效烃源岩分布预测。

#### 一、单井烃源岩有机质丰度与沉积相分析

充分利用钻井岩心、岩屑的各种有机地球化学分析数据、测井预测 TOC 数据与测井资

料等，进行有机质丰度、沉积相研究，建立单井有机质地球化学、沉积相综合柱状图（图 1-7），明确沉积相与有机质丰度的对应关系，确定有效烃源岩发育的有利沉积相。根据有效

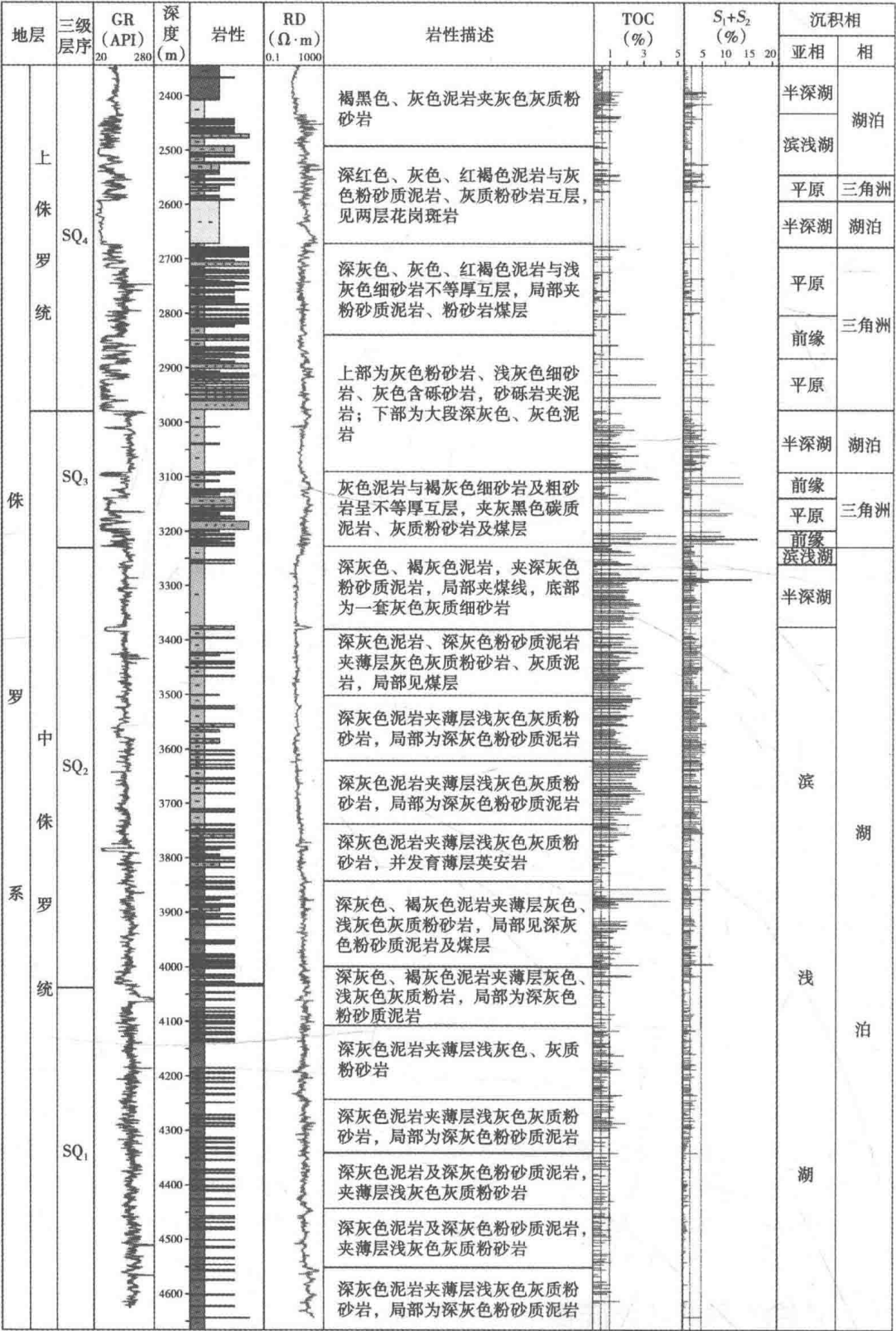


图 1-7 某盆地 W1 井侏罗系烃源岩有机质丰度、沉积相综合柱状图（据冯常茂等，2013）

烃源岩有机质丰度下限值研究结果，按照主要烃源岩发育层段统计不同沉积相段对应的达到有效烃源岩有机质丰度下限值的烃源岩厚度及其与地层厚度的比值（源地比）（图 1-8）。

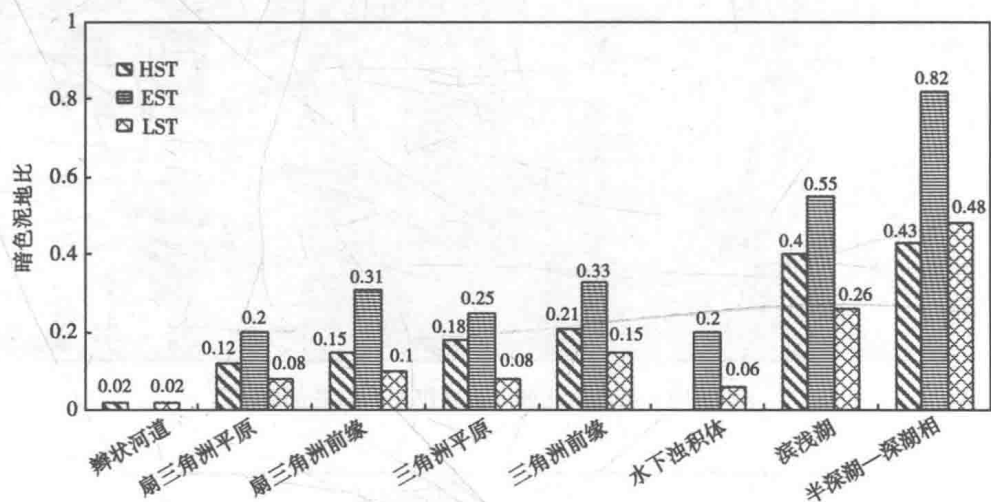


图 1-8 某盆地古近系某层位不同体系域和沉积相带源地比对比图

## 二、单井相—地震相确定沉积相平面分布

利用地震资料划分层序、体系域，进行地震相识别与划分（图 1-9），分析单井沉积相与地震相对应关系（图 1-10），确定不同层序/体系域沉积相分布，绘制不同层序/体系域沉积相平面分布图（图 1-11）。

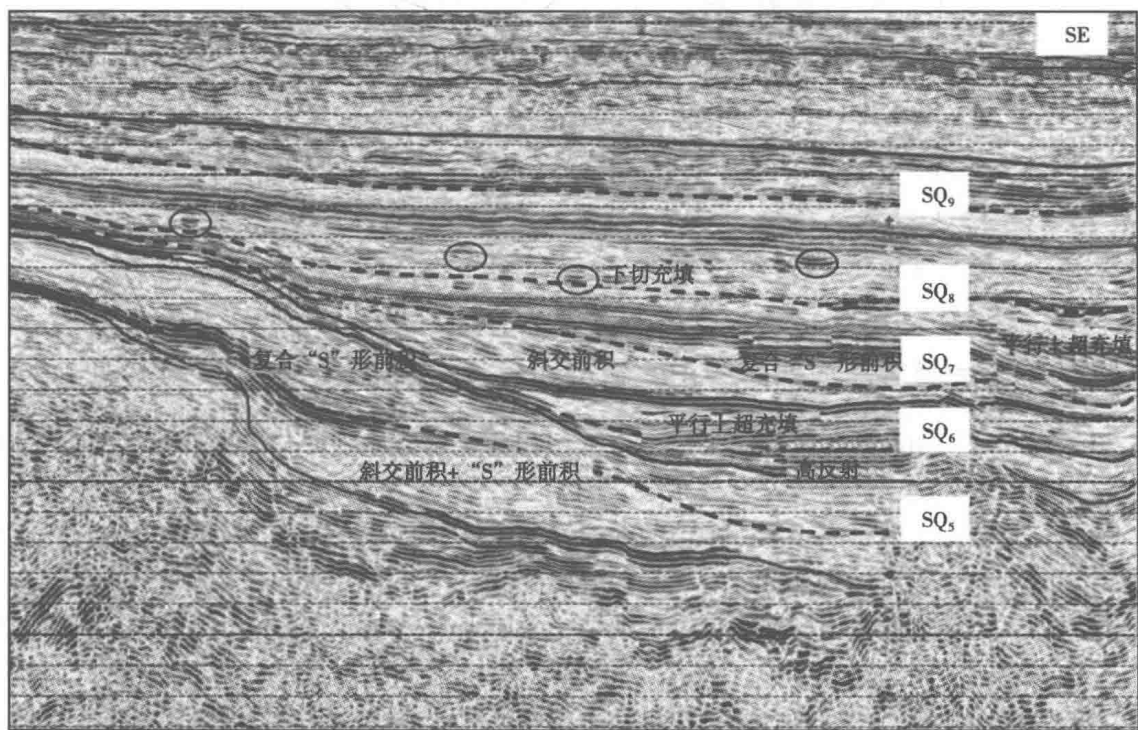


图 1-9 国外某盆地北部地震相纵向对比图