

# 海相烃源岩的正反演对比分析

解习农<sup>1</sup>, 殷鸿福<sup>2</sup>, 谢树成<sup>2</sup>

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 海相优质烃源岩有效的评价体系是海相地层油气勘探开发中的关键问题之一。沉积盆地内保存的残余有机质从生物物质到烃源岩的演化过程经历了两个阶段, 即从生物物质到沉积有机质的形成阶段和从沉积有机质到残余有机质的烃源岩形成阶段, 后者包括沉积有机质在未熟阶段经历生物化学作用成为埋藏有机质和在成熟—过成熟阶段经历热解作用成为残余或风化残余有机质两个亚阶段。烃源岩反演分析是利用残余或风化残余有机质的量来推断埋藏有机质的量或者原始生烃潜力, 而正演分析则是根据沉积物沉积环境、生物物质及其介质物理化学条件特征运用地球生态学、地球微生物学、分子地球生物学和生物地球化学方法推断沉积有机质的量, 甚至推断埋藏有机质的量, 进而评估烃源岩的原始生烃潜力, 也就是利用生物生产力和保存环境等综合分析沉积有机质的量。正反演对比分析相互验证和相互补充, 更好地揭示了烃源岩基本特征, 为海相优质烃源岩的预测和评价提供了有效的研究方法。

**关键词:** 海相烃源岩; 沉积有机质; 埋藏有机质; 残余有机质; 评价体系。

中图分类号: P539.2; P618.130

文章编号: 1000—2383(2007)06—0861—07

收稿日期: 2007—08—12

## Comparison on Forward and Inverse Analysis Methods of Marine Hydrocarbon Source Rocks

XIE Xi-nong<sup>1</sup>, YIN Hong-fu<sup>2</sup>, XIE Shu-cheng<sup>2</sup>

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** An effective evaluation system of high-quality marine source rocks plays an important role in hydrocarbon exploration and exploitation of marine strata. Remnant organic matter preserved in a sedimentary basin underwent two evolutionary stages from organic matter to source rocks, i. e. the formation of deposited organic matter and the formation of source rocks transferring from deposited organic matter to remnant organic matter. The latter includes the immature stage during which the deposited organic matter experienced biogeochemical processes to become burial organic matter, and the mature and the post-mature stages during which the burial organic matter underwent geothermal processes to become remnant organic matter and subsequently to be weathered. The inverse analysis of source rocks is defined as a method and technique to estimate the amount of burial organic matter and original potential of hydrocarbon generation of source rocks based on the analysis of remnant or weathered organic matter. The forward analysis of source rocks is defined as a method to estimate the amount of depositional organic matter or burial organic matter, and ulteriorly to estimate their original potential of hydrocarbon generation of source rocks by using the information of sedimentary environments, features of living biomass and physical chemistry in water medium through the geobiological analysis of geoecology, geomicrobiology, molecular geobiology and biogeochemistry. Quality and quantity of depositional organic matter can be calculated according to the productivity and preservation environments. Comparison between the forward and the inverse analysis can be validated and complemented by each other, which would reveal the features of source rocks and provide an effective method for the prediction and evaluation of good-quality marine source rocks.

**Key words:** marine source rocks; depositional organic matter; burial organic matter; remnant organic matter; evaluation system.

基金项目: 中国石油化工股份有限公司海相油气勘探前瞻性项目(No. G0800-06-ZS-319)。

作者简介: 解习农(1963—), 男, 教授, 主要从事能源地质与盆地流体的教学和科研工作。E-mail: xnxie@cug.edu.cn

海相地层一直是世界上一个重要的油气勘探领域。近年来,塔河油田、普光气田等大型油气田的发现显示了我国海相地层油气勘探领域广阔,油气资源远景巨大,是一个值得探索和发展的油气勘探领域。然而,由于我国海相烃源岩具有时代老、埋藏深、成熟度高,而且大多经历了多期构造运动等特点(金之钧等, 2005; 马永生, 2006),使得烃源岩识别和评价存在极大的困难,从而制约我国海相盆地油气勘探。多年来,利用反演法对我国海相烃源岩开展了大量的研究和测试工作,并取得了丰硕成果(戴金星等, 2000; 梁狄刚和陈建平, 2005; 秦建中, 2005),这些成果对我国海相油气勘探起到了巨大的推动作用。尽管以往已经开展大量海相烃源岩成因与分布研究,但很少从正演法角度论述和评价海相烃源岩,缺乏系统的地球生物学过程分析,很少论及古海洋(如冷水或热水环境、洋流等)、古气候、古生物群落对优质烃源岩形成的影响,因而,使得海相优质烃源岩形成机制和评价体系存在一定的局限性。本文拟通过烃源岩正反演分析方法的介绍,为沉积有机质和原始生烃潜力的恢复提供有效研究思路和工作方法。

## 1 烃源岩有机质演化及其主控因素

油气起源于生物物质,从生物物质到烃源岩的演化过程经历了一个漫长而又复杂的过程,这个转化过程是从生物有机质进入到沉积有机质时开始的。沉积有机质是随无机质点一起沉积并保存下来的生物残留物质,它包括生物的遗体及其生命过程的排泄物和分泌物。沉积有机质一方面来源于水盆地本身的所谓原地有机质,另一方面来自于周围陆地由水流携带的异地有机质或者更老沉积物中再沉积有机质。目前,我们从岩石中所获得的有机质为经过复杂转化后的残余有机质,甚至是经过风化后的风化残余有机质。

不难看出,从生物物质到烃源岩的演变过程经历了两个阶段,即从生物物质到沉积有机质的形成阶段和从沉积有机质到残余有机质的烃源岩形成阶段。前者代表水盆地中生物物质死亡后沉积到海底或湖底并在水—沉积物界面(SWI, sediment-water interface)经历水底的氧化还原作用,直至有机质被沉积物所覆盖的过程,也就是从生物物质演变成沉积有机质的过程。后者包括从沉积有机质在未成熟阶段经历生物化学作用形成埋藏有机质过程和在成

熟—过成熟阶段经历热解作用形成烃类过程。沉积有机质在埋藏过程中经历了地质条件下的生物、化学和物理作用,使其发生了与介质环境相适应的变化以及有机、无机相互作用。根据有机质的成烃演化进程及其产物特点可划分为 3 个演化阶段,即成岩作用、深成作用和准变质作用阶段。因此,沉积盆地内保存的残余有机质从生物物质到烃源岩的演化过程经历了从生物物质到沉积有机质的埋藏过程、从沉积有机质到埋藏有机质的早期成岩过程(成岩作用阶段)、到从埋藏有机质到残余有机质的晚期成岩过程(深成作用和准变质作用阶段)(图 1)。

### 1.1 沉积作用阶段沉积有机质形成的主控因素

在海底和湖底沉积物中,有机碳含量与水体中原始生物量之间并没有系统的对应关系(Demaison and Moore, 1980)。原因是有机质保存条件与生物生产力同样非常重要。世界范围内研究表明,海洋盆地中仅有 0.6% 有机碳保存在沉积物中(Hunt, 1979)。显然,沉积物中沉积有机质的含量不仅仅受控于原始生物量或生物生产力,还受控于氧化还原条件和沉积速率。

生物生产力为海底和湖底沉积物中有机碳含量提供物质基础,在海相沉积中,水体中生物生产力是控制沉积物中有机碳丰度的最重要因素。在现代海洋中,有机碳生产率大于每年每平方米 200 g 碳的区域均位于高生产力的区域(Pedersen and Calvert, 1990; Calvert *et al.*, 1995)。即使在非还原环境中,如有足够丰富的有机质也可以形成高有机碳的海相沉积,因为丰富的有机质在其分解时可以消耗大量的氧气,造成水底缺氧并形成还原环境(Calvert, 1987)。

氧化还原条件是影响有机质保存的重要因素。它是指生物死亡后的沉降、沉积和埋藏过程中的氧化还原条件。无论是水体还是沉积物中氧化还原环境都会对沉积有机质的量产生明显的影响。一方面水体中氧化还原条件影响水中生物种类和生物量,比如,当水体从氧化环境变到准厌氧环境,所有海底生物种属分异度将呈指数减少(Rhoads and Morse, 1971)。另一方面,水—沉积物界面氧化还原条件影响生物有机质的降解和保存。原始有机质的高产量并不等于沉积有机质的高丰度,常常因沉积过程中多种因素的影响而导致有机质或保存富集、或破坏稀释。比如,有机质在缺氧条件下的有限降解,就使得有机质得到良好保存。Bralower and Thierstein

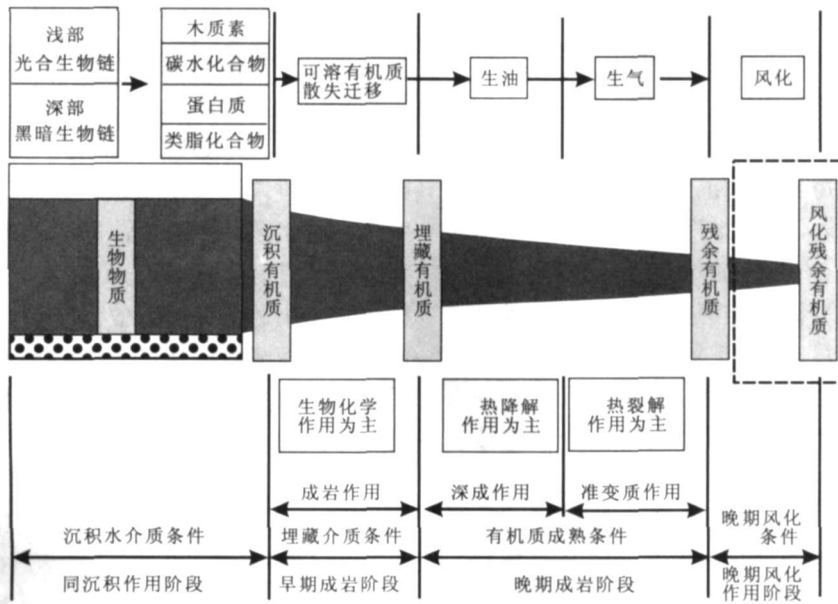


图 1 烃源岩中生物有机质演化过程及成岩阶段划分

Fig. 1 Evolution and diagenesis stages of sedimentary organic matters in the source rocks

(1984)报道现今中太平洋强氧化环境仅有 0.01% 有机质被保存下来,而在黑海等强还原环境则有 10% 有机质能够保存下来。

沉积速率是影响沉积物中有机质富集程度的另一因素。沉积速率过快影响到沉积物中有机质稀释程度,沉积速率过慢影响到有机质的保存效率。通常在快速堆积的地层中,有机质丰度都较低。Rullkötter (1999) 认为,在海相沉积中富有机碳沉积物分布在最小含氧带区域,这些区域的沉积速率相对较低,而在有机碳含量低的区域表现出很高的沉积速率(Schulte *et al.*, 2000)。但沉积速率过低,则有机质未及埋藏即被氧化或被生物活动所破坏。Mucci *et al.* (2000) 研究表明,初级生产力中的 10% 被垂直输送到沉积物,大约有 4% ~ 5% 随沉积物被埋藏,有 6% 在沉积物-水界面及其下发生了矿化,并以无机碳的形式返回到水体中。有机碳和无机碳的埋藏速度大约为  $0.74 \sim 1.44 \text{ mmol} \cdot \text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 氧化速度为  $2.73 \text{ mmol} \cdot \text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。也有文章认为,在从水体向沉积物沉淀过程中,大部分有机质在细菌的氧化下迅速地返回到水体,只有小部分到达了海底。随沉积物被埋藏的有机碳占初级生产力的 3.5%,埋藏速度大约为  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

此外,陈践发等(2006)认为,现在海底热水活动对沉积有机质的富集也具有明显的控制作用。现代海洋调查显示,在日本 Fiji 盆地北部一系列热水活

动区存在大量以细菌为主的生物,如硫细菌、铁细菌和食甲烷细菌等,且在热水区有菌席出现(Halbach *et al.*, 2001)。在深海水体中热水流体活动区有大量的非光合作用生物群落存在(Summit and Baross, 2001)。现代海底热水流体活动调查发现,海底热水流体活动区生物产量往往与热水流体活动强度呈正比关系(Haymon *et al.*, 1993),海底热水沉积矿层中有机碳含量从近矿区到远矿区逐渐降低,表明热水沉积物的有机质富集与热水活动密切相关(孙省利, 1999)。热水沉积岩中的有机质富集作用与嗜热生物群落有关(林丽, 2001)。

### 1.2 成岩阶段有机质演化的主控因素

沉积有机质随着上覆沉积物厚度的增大、温度的增高,有机质经历了成岩作用、深成作用和准变质作用阶段。在成岩作用阶段,有机质处于未成熟阶段,有机质以生物化学作用为主,即不同类型微生物将原始的有机质中的 O、S、N、P 等元素分离出来,使 C、H 富集起来。微生物一般作用于有机质改造早期。在沉积物中,微生物活动的总趋势一般随埋深增加而减弱,而且在垂向上不同类型的微生物则出现连续分带现象,即从浅到深为喜氧菌带、厌氧还原菌带和产甲烷菌带。相应地,垂向上可以划分为氧化分解作用带、硝酸盐还原作用带、硫酸盐还原作用带和甲烷形成作用带(Meyers *et al.*, 2003)。成岩作用早期,有机质要经历菌解和水解,使原来的脂肪、蛋

白质、碳水化合物和木质素等生物聚合物转化为分子量较低的脂肪酸、氨基酸、糖、酚等生物化学单体,同时还产生  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{NH}_3$  等简单分子。随着埋深的增加,微生物作用趋于终止,生物化学单体缩聚成复杂的高分子腐植酸类进而演化为地质聚合物即干酪根。成岩作用阶段尤其是早期生成的烃类产物,是生物甲烷和少量高分子烃。显然,在早期成岩阶段影响有机质演化的主要因素是氧化还原条件及各种微生物发育及改造程度,特别是氧化还原条件。如果在浅埋藏沉积物中为强氧化环境,将会使沉积物中有机质发生强烈的分解和破坏,大大地减少被埋藏有机质的含量。

当沉积有机质进入成熟—高成熟阶段 ( $R_0$  为  $0.5\% \sim 2.0\%$ ),包括成熟生油阶段  $0.5\% \sim 1.3\%$ ,高成熟湿气阶段  $1.3\% \sim 2.0\%$ ,该时期有机质通过热降解作用主要产生液态石油和湿气。当进入过成熟阶段 ( $R_0 > 2.0\%$ ),有机质通过热裂解作用主要产生干气。以中—低分子量的烃类为主,生物烃的奇碳优势渐失,环烷和芳香烃的碳数和环数减少;后者在热裂解作用下生成高温甲烷,而且先生成的轻质油和湿气也将裂解为热力学上最稳定的甲烷。显然,在晚期成岩阶段影响有机质演化的主要因素为有机质类型、温度和时间以及有机—无机反应的催化剂等。其中温度在干酪根成烃演化过程中起着决定性的作用。

## 2 正反演分析及原始有机质恢复

### 2.1 正反演分析方法及其应用范围

烃源岩正反演分析是从残余或风化残余有机质的量推断埋藏有机质的量或者原始生烃潜力。通常可以通过残余有机质的热解分析来判断有机质转化率,依此来计算埋藏有机质的量和原始生烃潜力。烃源岩正反演分析是根据沉积物沉积环境、生物物质及其介质物理化学条件特征,运用地球生态学、地球微生物学、分子地球生物学和生物地球化学方法推断沉积有机质的量,甚至推断埋藏有机质的量,进而评估烃源岩的原始生烃潜力(Xie *et al.*, 2005; 谢树成等, 2007)。正反演分析是从岩石中现今保存的残余有机质分析入手,而正演分析则是从沉积物所形成的地球生物学过程入手,也就是从生境型(群落型)、生产力和有机质的沉积和埋藏过程等分析入手。

图 2 说明了不同正反演方法在原始有机质恢复

中的适用范围。传统地球生态学和地球微生物学分析可以很好地揭示生物物质类型、丰度以及水—沉积物界面的氧化还原条件(殷鸿福等, 2004),结合将今论古思路,可以判断沉积有机质的量。分子地球生物学方法可以通过生物标记化合物(分子化石)研究生产力的组成(谢树成等, 2007)。由于生物标志化化合物的来源具有一定的专属性,即使是有机质经过生物化学作用后仍保留有效信息,因此,这种分析方法可以推断埋藏有机质的量。生物地球化学方法是利用某些表征生源要素的元素来分析古生产力(谢树成等, 2006)。通过对现代海洋生源要素的生物地球化学过程的观察,一些学者提出了硅、磷、钡、铁是古生产力最有潜力的替代指标(Henderson, 2002; Van de Schootbrugge *et al.*, 2003),这些元素的含量与有机碳含量具有很好的相关关系,可以较好地表征生产力的变化。此外,铁、钼同位素也与有机碳含量具有很好的相关关系,利用有机碳和无机碳同位素的差值( $=^{13}\text{C}_{\text{carb}} - ^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )也可以定量计算有机碳埋藏分数(Kump and Arthur, 1999; Voigt *et al.*, 2006),这些方法为生物—环境—有机碳埋藏的耦合关系奠定了基础,也就是说可以构建不同生境型中表征生源要素的元素及其同位素变化与有机埋藏量关系的模型。所以,这种方法不仅可以推断沉积有机质在量上的变化,也可以推断埋藏有机质的量(谢树成等, 2007)。

### 2.2 原始有机质的恢复

从生物物质到烃源岩的转化过程明显可以划分出两个阶段,第一阶段就是沉积有机质形成阶段,即水生生物死亡后随沉积物下沉埋藏后形成的沉积有机质,第二阶段就是埋藏于沉积物中的有机质经过生物化学作用和热解作用破坏或成烃后形成的残余有机质。因此,原始有机质恢复( $\text{TOC}_{\text{or}}$ )可以分解为两部分。

第一阶段沉积有机质可以表述为:

$$\text{TOC}_{\text{or}} = (\text{PP} - \text{PP}_{\text{lost}}) / (\text{SR} \times \rho)$$

式中:  $\text{TOC}_{\text{or}}$  为原始沉积有机质( $\%$ );  $\text{PP}$  为水介质中生产力( $\text{g}/\text{m}^2/\text{a}$ );  $\text{PP}_{\text{lost}}$  为水介质中死亡生物到被沉积物埋藏过程中被破坏分解部分;  $\text{SR}$  为沉积速率( $\text{m}/\text{a}$ );  $\rho$  为岩石密度( $\text{g}/\text{m}^3$ )。

第二阶段残余有机质可以表述为:

$$\text{TOC}_{\text{res}} = \text{TOC}_{\text{or}} - \text{TOC}_{\text{bact}} - \text{TOC}_{\text{th}}$$

式中:  $\text{TOC}_{\text{res}}$  为烃源岩中残余有机质( $\%$ ),可以实测获得;  $\text{TOC}_{\text{bact}}$  为有机质在未成熟阶段经过生物化学作

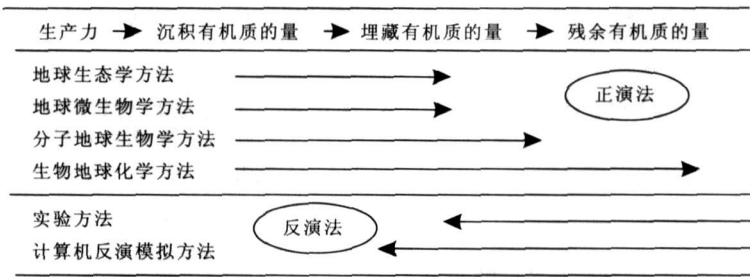


图 2 正反演方法应用范围对比

Fig. 2 Comparison between forward and inverse analysis methods

用所损失的有机质的百分含量(%)； $TOC_h$  为有机质在热解作用过程中所分解的有机质的百分含量(%)。

为了更好地表述生物生产力、原始有机质含量以及残余有机质量之间的变化速率,本文提出有机碳保存系数和有机碳转化系数。有机碳保存系数(OCPE, preservation factor)是指海底沉积物中有机碳丰度与上覆水体中原始生物生产力的百分比。通常情况下,海相盆地仅有 0.6% 有机碳被保存(Hunt, 1995)。

$$OCPE = (TOC_{or} \times \rho) / (PP \times SR).$$

式中:  $TOC_{or}$  为沉积物中有机质丰度(%)。

有机碳转化系数(OC<sub>TR</sub>, transition factor)是指残余有机碳含量与沉积有机质的量之比(%)。它包括经过生物化学作用后损耗的有机质的量和经过热解作用后损失的有机质的量,后者可称之为有机质生烃转化率。一般情况下,有机质在成熟阶段生烃转化率为 5%~10%,很少超过 20%,在过成熟阶段生烃转化率可达 30% 以上(陈荣书, 1994)。其中有机质生烃转化率受有机质类型影响较大。一般认为,烃源岩中 I 型和 II 型干酪根具有较高的转化率,而 II 型和 IV 型干酪根具有较低的转化率。在反演法分析中,有机质生烃转化率的计算主要根据现今残余有机质含量的测试和热模拟实验方法(ROCK-EVAL)来恢复埋藏有机质丰度。所以,有些学者采用原始有机质丰度恢复系数概念。一般情况下,通常 I 型和 II 型有机质的有机碳丰度恢复系数为 1.6 和 1.22。根据秦建中(2005)研究成果,在我国高成熟—过成熟海相烃源岩(0.3% <  $TOC$  < 30%)中, I 型、II 型、II 型烃源岩有机碳丰度恢复系数分别为 1.7、1.5 和 1.35。

### 3 正反演对比在烃源岩分析中的应用

现今烃源岩的评价通常是

根据岩石中残余有机质含量进行,比如有效烃源岩  $TOC$  含量平均在 0.40%~0.50% 以上,优质烃源岩的  $TOC \geq 2%$  (胡见义和黄第藩, 1991)。由于我国海相烃源岩,特别是南方海相烃源岩,经历了多期构造活动,多源、多期成烃成藏,高热演化条件下常规有机地球化学指标又往往失效,这些因素大大制约了烃源岩的有效评价。因此,如何正确识别有效烃源岩仍是当前亟待解决的一个关键科学问题,探索高一过成熟区烃源岩评价的有效指标或新途径具有普遍的意义。烃源岩的正反演对比分析,一方面利用烃源岩的地球生物学基本数据资料与现今烃源岩有机质丰度、类型等参数的综合对比分析,更好地确定烃源岩有机质来源、组成及类型;另一方面通过对现今烃源岩的厚度、分布和有机质丰度、类型研究(反演分析)以及地球生物学特征(正演分析)对比分析,既有效地确定不同生境型、不同地球生物相中沉积有机质富集机理,还可以计算可能的原始生烃潜力。无疑,烃源岩的正反演对比分析为烃源岩的识别和评价提供了一个有效方法和思路。

正反演对比在烃源岩分析中的应用主要体现在以下两个方面:其一,弥补了现今烃源岩评价系统的不足,有可能揭示现今残余有机碳较低的潜在烃源岩,这些烃源岩可能由于高有机质转化系数或高生烃转化率使得现今岩石中有机碳低于有效烃源岩含量。其二,烃源岩正演法从生境型、生产力和有机埋藏环境等分析入手研究地球生物相与沉积有机质含量或埋藏有机质含量之间的关系。该方法避免了由于烃源岩样品有限所导致的认识片面性,结合宏观沉积学和地球生物相特征,从而更准确地预测了有效烃源岩的空间分布规律。总之,烃源岩正反演对比分析,更为全面地阐明了有机质富集的机理,为优质烃源岩的判识及其与传统烃源岩判识标准的校正关系提供了一个新的有效的方法。

致谢: 本文的主要内容得益于中国石油化工股份有限公司海相油气勘探前瞻性项目(海相优质烃源岩形成的地球生物学过程 G0800-06-ZS-319)的多次集体讨论会. 在此谨向他(她)们表示感谢.

## References

- Bralower, T. J., Thierstein, H. R., 1984. Low productivity and slow deepwater circulation in Mid-Cretaceous oceans. *Geology*, 12: 614–618.
- Calvert, S. E., 1987. Oceanographic controls on the accumulation of organic matter in marine sediments. In: Book, J., Fleet, A., eds., *Marine petroleum source rock*. Blackwell Scientific London, 137–151.
- Calvert, S. E., Pedersen, T. F., Naidu, P. D., et al., 1995. On the organic carbon maximum on the continental slope of the eastern Arabian Sea. *Journal of Marine Research*, 53: 269–296.
- Chen, J. F., Zhang, S. C., Sun, S. L., et al., 2006. Main factors influencing marine carbonate source rock formation. *Acta Geologica Sinica*, 80(3): 467–472 (in Chinese with English abstract).
- Chen, R. S., 1994. *Geology of petroleum and natural gas*. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Dai, J. X., Wang, T. D., Dai, H. M., et al., 2000. Origin of large-scale carbonate gasfields in China (abstract). *Marine Oil and Gas Geology*, 5(1–2): 12–13 (in Chinese).
- Demaison, G. J., Moore, G. T., 1980. Anoxic environments and oil source bed genesis. *AAPG Bulletin*, 64(8): 1179–1209.
- Halbach, M., Koschinsky, A., Halbach, P., 2001. Report on the discovery of *Gallionella ferruginea* from an active hydrothermal field in the deep sea. *International Ridge-Crest Research*, 10(1): 18–20.
- Haymon, R. M., Fomari, D. J., Von Damm, K. L., et al., 1993. Volcanic eruption of the mid-ocean ridge along the East Pacific Rise crest at 9°45′–52′N: Direct submersible observations of seafloor phenomena associated with an eruption event in April, 1991. *Earth and Planetary Science Letters*, 119(1–2): 85–101.
- Henderson, G. M., 2002. New oceanic proxies for paleoclimate. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(1): 1–13.
- Hu, J. Y., Huang, D. F., 1991. *Principle and theory of continental petroleum in China*. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Hunt, J. M., 1979. *Petroleum geochemistry and geology*. Freeman and Company, San Francisco, 524.
- Hunt, J. M., 1995. *Petroleum geochemistry and geology*. W. H. Freeman and Company, New York.
- Jin, Z. J., Zhang, Y. W., Chen, S. P., 2005. Wave process of tectonic and sediment in Tarim basin. *Science in China (Ser. D)*, 35(6): 530–539 (in Chinese).
- Kump, L. R., Arthur, M. A., 1999. Interpreting carbon isotope excursions: Carbonates and organic matter. *Chemical Geology*, 161(1–3): 181–198.
- Liang, D. G., Chen, J. P., 2005. Oil-source correlations for high and over matured marine source rocks in South China. *Petroleum Exploration and Development*, 32(2): 8–14 (in Chinese with English abstract).
- Lin, L., 2001. The mineralization of organism and organic matter in the Laerma gold deposit. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(2): 79–83 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. S., 2006. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 6): Puguang gas field in Sichuan basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 11(2): 35–40 (in Chinese with English abstract).
- Meyers, S. R., Sageman, B. B., Lyons, T. W., 2003. The role of sulfate reduction in organic matter degradation and molybdenum accumulation: Theoretical framework and application to a Cretaceous organic matter burial event. *Abstracts with Programs—Geological Society of America*, 35(6): 82.
- Mucci, A., Sundby, B., Gehlen, M., et al., 2000. The fate of carbon in continental shelf sediments of eastern Canada: A case study. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(3–4): 733–760.
- Pedersen, T. F., Calvert, S. E., 1990. Anoxia vs productivity: What controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rock? *AAPG Bulletin*, 74(4): 454–466.
- Qin, J. Z., 2005. *Hydrocarbon source rocks in China*. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Rhoads, D. C., Morse, J. W., 1971. Evolutionary and ecological significance of oxygen-deficient marine basins. *Lethaia*, 4(4): 413–428.
- Rullkötter, J. Z., 1999. Organic matter: The driving force for early diagenesis. In: Schulz, H. D., Zabel, M., eds., *Marine geochemistry*. Springer-Verlag Heidelberg, 129–172.
- Schulte, S., Mangelsdorf, K., Rullkötter, J., 2000. Organic matter preservation on the Pakistan continental margin

- as revealed by biomarker geochemistry. *Organic Geochemistry*, 31(10): 1005–1022.
- Summit, M., Baross, J. A., 2001. A novel microbial habitat in the mid-ocean ridge seafloor. *PNAS*, 98(5): 2158–2163.
- Sun, S. L., 1999. Organic geochemical characters and metallogenesis of Xicheng Pb-Zn orefield, Gansu, China. *Acta Geologica Gansu*, 8(2): 58–64 (in Chinese with English abstract).
- Van de Schootbrugge, B., Kuhn, O., Adatte, T., et al., 2003. Decoupling of P- and C<sub>org</sub>-burial following Early Cretaceous (Valanginian-Hauterivian) platform drowning along the NW Tethyan margin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 199(3–4): 315–331.
- Voigt, S., Gale, A. S., Voigt, T., 2006. Sea-level change, carbon cycling and palaeoclimate during the Late Cenomanian of northwest Europe: An integrated palaeoenvironmental analysis. *Cretaceous Research*, 27(6): 836–858.
- Xie, S. C., Gong, Y. M., Tong, J. N., et al., 2006. Advancement from paleontology to geobiology. *Chinese Science Bulletin*, 51(19): 2327–2336 (in Chinese).
- Xie, S. C., Pancost, R. D., Yin, H. F., et al., 2005. Two episodes of microbial change coupled with Permo/Triassic faunal mass extinction. *Nature*, 434(7032): 494–497.
- Xie, S. C., Yin, H. F., Xie, X. N., et al., 2007. On the geobiological evaluation of hydrocarbon source rocks. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(6): 727–740 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Yang, F. Q., Xie, S. C., et al., 2004. Biogeology. Science and Technology Press of Hubei, Wuhan (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 陈践发, 张水昌, 孙省利, 等, 2006. 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要影响因素. *地质学报*, 80(3): 467–472.
- 陈荣书, 1994. 石油及天然气地质学. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 戴金星, 王廷栋, 戴鸿鸣, 等, 2000. 中国碳酸盐岩大型气田的起源(摘要). *海相油气地质*, 5(1–2): 12–13.
- 胡见义, 黄第藩, 1991. 中国陆相石油地质理论基础. 北京: 石油工业出版社.
- 金之钧, 张一伟, 陈书平, 2005. 塔里木盆地构造—沉积波动过程. *中国科学(D辑)*, 35(6): 530–539.
- 梁狄刚, 陈建平, 2005. 中国南方高、过成熟区海相油源对比问题. *石油勘探与开发*, 32(2): 8–14.
- 林丽, 2001. 拉尔玛金矿生物—有机质成矿作用. *矿物岩石地球化学通报*, 20(2): 79–83.
- 马永生, 2006. 中国海相油气田勘探实例之六: 四川盆地普光大气田的发现与勘探. *海相油气地质*, 11(2): 35–40.
- 秦建中, 2005. 中国烃源岩. 北京: 科学出版社.
- 孙省利, 1999. 西成铅锌矿田有机地球化学特征及成矿作用. *甘肃地质学报*, 8(2): 58–64.
- 谢树成, 龚一鸣, 童金南, 等, 2006. 从古生物学到地球生物学的跨越. *科学通报*, 51(19): 2327–2336.
- 谢树成, 殷鸿福, 解习农, 等, 2007. 地球生物学方法与海相优质烃源岩形成的正演和评价. *地球科学—中国地质大学学报*, 32(6): 727–740.
- 殷鸿福, 杨逢清, 谢树成, 等, 2004. 生物地质学. 武汉: 湖北科学技术出版社.