

文章编号:1000-0550(2004)增刊-0073-06

烃源岩 TOC 值变化与其生排烃效率关系的探讨^①

钟宁宁¹ 卢双舫² 黄志龙¹ 张有生¹ 薛海涛²

1(石油大学(北京)教育部石油天然气成藏机理重点实验室 北京昌平 102249)

2(大庆石油学院勘探系 黑龙江大庆 163000)

摘 要 采用实验模拟和数值模拟相结合的方法揭示了烃源岩有机碳(TOC%)的损失率 $DTOC = (TOC^0 - TOC) / TOC^0$ 的变化规律。当烃源岩生排烃效率很低时,DTOC 都为负值,即在成熟演化过程 TOC 是增加的。随着生排烃效率提高,有机碳变化率 DTOC 逐渐增加(TOC 损失率增大),烃源岩逐步由“增碳”进程转变为“减碳”进程。但只有生烃潜力很高的 I 型有机质岩石,在生烃降解率和排烃效率极高的“理想”条件下,DTOC 的增加(减碳进程)幅度才十分显著。指出基于有机质原始丰度恢复的碳酸盐岩烃源岩评价标准,可能过分强调了“减碳”的进程,很多情形下会美化原本比较差的烃源岩。

关键词 烃源岩评价 有机质丰度 TOC 值 生排烃效率

第一作者简介 钟宁宁 男 1960 年出生 博士 教授 油气地球化学 环境地球化学

中图分类号 P593 **文献标识码** A

1 引言

在中国广泛分布的海相碳酸盐岩,普遍具有“老、少、高、杂”的特征。所谓“老”是指沉积时代老,尤其以古生代沉积居多;“少”即有机质含量少(丰度低);“高”则是指有机质成熟度高,普遍达到高一过成熟阶段;“杂”谓之经历了多期的复杂构造运动。这些特点导致了几十年来在碳酸盐岩烃源岩评价工作中,有机质丰度恢复及以此为基础的生烃潜力恢复大行其道^[1~4]。然而,近年来随着勘探实践和碳酸盐岩地球化学研究工作的深入,有机质丰度恢复方法受到越来越多的质疑^[4~8]。产生这些争议的实质是对烃源岩热演化过程中 TOC 值的变化规律及其控制因素认识上的分歧。

TOC 被定义为单位质量岩石中有机碳的含量,它是岩石中有机质相对丰度的表征。人们从干酪根热降解生烃理论,很自然地把生排烃过程有机质总量必然的消耗和 TOC 的降低想当然地联系在一起。但是,生排烃过程有机质总量的损耗并不完全等同于岩石总有机碳含量 TOC 的减少,因为 TOC 所反映的不过是岩石中有机物的相对含量,其数值变化显然受到有机物质和岩石无机物质两个方面因素的影响。

由于生排烃过程中烃源岩 TOC 值(总有机碳含量)的变化幅度对确定烃源岩有机质的丰度下限值有重要意义,因此,本文着重从烃源岩热演化过程有机-无机物质平衡的角度探讨 TOC 值变化与生排烃效率

的关系。

2 实验模拟生排烃过程中 TOC 的变化

选取成熟度一致,原始 TOC 值在 0.1%~0.5% 之间,并且有机质丰度相对应的 5 对碳酸盐岩和泥岩样品。通过人工模拟生排烃过程来考察 TOC 值的变化规律,以及有机碳损失率的影响因素的技术思路,分别采用了半封闭体系的高温高压模拟实验和开放体系的高温模拟实验两种不同条件的实验模拟方法,样品和实验条件见文献^[9]。

(1) 在高温高压的半封闭体系中,由于生排烃效率较低,导致烃源岩的 TOC 值在生排烃过程基本保持恒定。无论是碳酸盐岩还是泥岩,TOC 值随温度增高的减少幅度几乎都在该分析方法标准所规定允许误差范围内,多数样品只有在加热温度达到 520℃ 以上后,TOC 值的减少才略为明显(图 1a)。

由实验模拟所达到的高温、残余岩石生烃潜力变化、残余干酪根 C、H、O 元素的变化以及加热前后的物质平衡关系来看,有机质确实已被消耗,并生成了数量可观的气、液产物(图 2)。但总的说来,在高温高压的半封闭体系中的生烃降解率比较低,最大不过 100 mg·烃/g·有机碳^[10]。

(2) 开放体系中,烃源岩的 TOC 值在生排烃过程有明显的减少(图 1b)。与半封闭体系下的热模拟实验相比,所采用的样品相同,只是开放体系下模拟实验的

①国家重点基础研究发展规划项目 G19990433-07 资助
收稿日期:2003-11-15

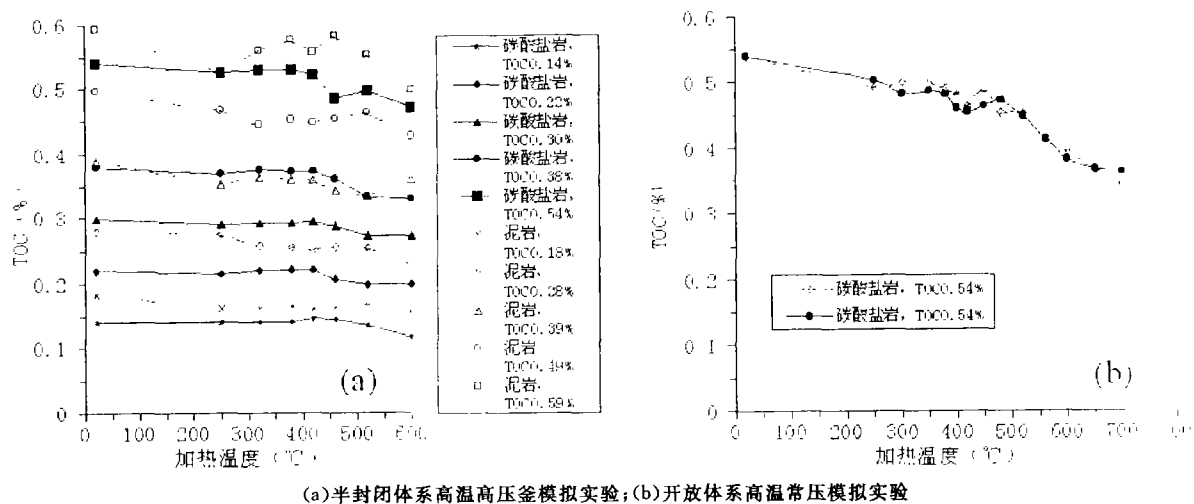
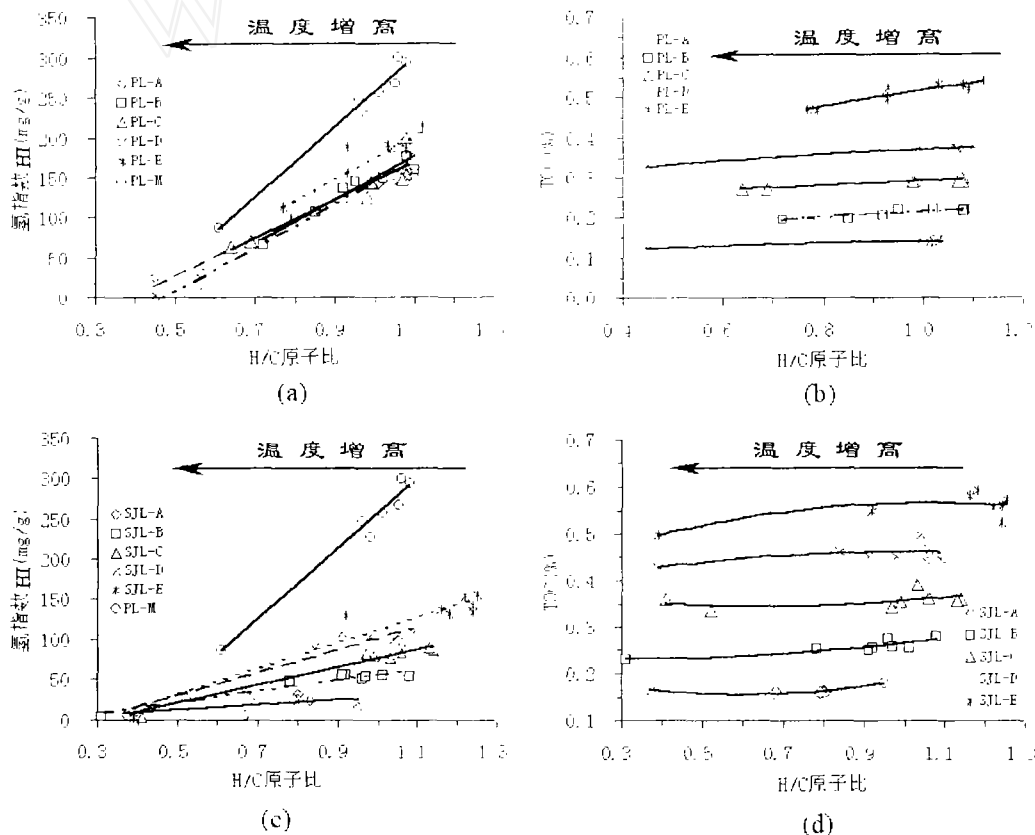


图1 人工热模拟生排过程烃源岩 TOC 值的变化

Fig. 1 Variation of TOC in source rock during thermal simulation of hydrocarbon generation and expulsion



a, b. 碳酸盐岩; c, d. 泥质岩

图2 半封闭体系中烃源岩的生烃潜力和干酪根元素组成变化

Fig. 2 Variation of hydrocarbon potential and elemental composition of kerogen in source rock under semi-closed system

生排效率有了明显提高,最大降解率达到 $240 \text{ mg} \cdot \text{烃}/\text{g} \cdot \text{有机碳}$ 。可见,烃源岩的生排效率可能制约了 TOC 值变化。

通常认为,随着岩石中有机质被消耗生烃并排驱之后,TOC 值应随之降低。但是由 TOC 定义可知,这必须以成烃过程中岩石总质量恒定为前提。事实上,从热模拟过程各种无机流体的产生和排出就可以断定,岩

石质量在成烃过程中也是不断被消耗的。因此,TOC 值在生排过程保持不变的前提是有机质和无机物都以相同速率损耗。而当生排烃导致的有机质消耗率高于无机物损耗率时,TOC 值则表现出不断下降的趋势。

实验结果启示我们,TOC 值的变化要置于烃源岩生排过程的有机-无机物质平衡关系中讨论。在实

实验室条件下无机物的损耗主要与矿物脱水有关,且数量有限,根本无法与地质体中压实、压溶造成的无机流体损耗相提并论,因而,在实验室中很容易观察到的 TOC 值随生排烃过程减少的趋势,在地质体中却很少见。这种有机—无机物质平衡关系以及实验室条件与自然条件的差异,恰恰是以往研究 TOC 值在烃源岩成熟作用过程变化规律时所忽略的,其结果有可能误认为烃源岩有机质损耗等同于 TOC 值降低,而滥用原始 TOC 恢复来评价高过成熟烃源岩,尤其是高过成熟碳酸盐岩。

3 生排烃过程 TOC 值变化的数值模拟

模拟实验揭示了烃源岩生排烃过程 TOC 值的变化可能受生排烃效率的控制。运用数值模拟的方法可以进一步从生排烃过程中有机—无机物质平衡关系讨论有机质的生排烃过程和岩石的失重过程对有机碳损失率的影响,以期定量描述地质因素对有机碳含量变化的影响及从理论上阐明有机碳损失率的可能变化幅度及范围,从而为确定烃源岩的丰度下限值提供理论依据。

3.1 数值模型及参数选取

设单位体积岩石的原始孔隙体积为 Φ_0 , 孔隙中饱和水, 水的密度为 ρ_w , 岩石骨架的密度为 ρ , 经过一定程度演化后, 岩石的孔隙体积为 Φ , 该过程的物理模型见图 3。

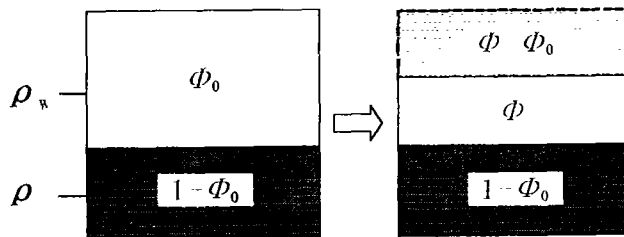


图 3 岩石生排烃过程的孔隙变化模型

Fig. 3 Model for porosity change in the process of hydrocarbon generation and expulsion of source rock

设初始状态时岩石的质量为 m_0 , 演化到一定阶段后的质量为 m , 由模型可得

$$m = \rho_w + (1 - \Phi_0)\rho \quad (1)$$

$$m_0 = \rho_w \Phi_0 + (1 - \Phi_0)\rho \quad (2)$$

设岩石原始有机碳的质量为 m_c^0 , 残余有机碳的质量为 m_c 。则, m_c 等于 m_c^0 减去排出烃带走的有机碳和生成 CO_2 所损失的有机碳。即

$$m_c = m_c^0 - m_c^0 \cdot G \cdot K \cdot E - m_c^0 \cdot G_{\text{CO}_2} \cdot K_{\text{CO}_2} \cdot I_o \quad (3)$$

式中: m_c^0 为原始有机碳的质量(g); m_c 为残余有机碳的质量(g); G 为有机质成烃降解率(gHC/gC); K_1 为原始有机质中含碳率; K 为烃的含碳率; E 为排

烃效率(%); G_{CO_2} 为有机质演化过程中 CO_2 生成率(%); I_o 为氧指数, 每克有机碳中 CO_2 的质量(g CO_2 /gC); K_{CO_2} 为二氧化碳的含碳率(12/44)。

设岩石的原始有机碳为 TOC^0 , 残余有机碳为 TOC 。根据定义, 有机碳等于岩石中有机碳的质量除以岩石质量(水+岩石骨架)与岩石中有机质的质量之和, 即

$$\text{TOC}^0 = \frac{m_c^0}{m_0 + m_c^0/K_1} \quad (4)$$

$$\text{TOC} = \frac{m_c}{m + m_c/K_2} \quad (5)$$

其中: K_1 、 K_2 分别为原始有机质和残余有机质中含碳率。

由上面各式可以推出有机碳损失率 DTOC 的计算公式为:

$$\text{DTOC} = \frac{\text{TOC}^0 - \text{TOC}}{\text{TOC}^0} = 1 - \frac{m_c}{m_c^0} \cdot \frac{m_0 + m_c^0/K_1}{m + m_c/K_2} \quad (6)$$

亦即:

$$\text{DTOC} = 1 - (1 - G \cdot K \cdot E - G_{\text{CO}_2} \cdot K_{\text{CO}_2} \cdot I_o) \cdot \frac{\rho_w \Phi_0 + (1 - \Phi_0)\rho + m_c^0/K_1}{\rho_w \Phi + (1 - \Phi)\rho + m_c^0(1 - G \cdot K \cdot E - G_{\text{CO}_2} \cdot K_{\text{CO}_2} \cdot I_o)/K_2}$$

式中与 DTOC 有关的待定参数为 G 、 G_{CO_2} 、 K_{CO_2} 、 I_o 、 K 、 K_1 、 K_2 、 E 及 ρ_w 、 ρ 、 Φ_0 、 Φ 等。其中, 前 7 项参数是与生烃过程有关的参数, 根据文献^[11~15]可以确定它们的取值或关系式; E 为排烃效率, 设定为 10%、20%、...、90%等规则的数值, 它与前 7 项的结合决定了有机碳的损耗量; 后 4 项则是描述岩石失重的参数, 岩石骨架密度和水的密度分别取值 2.8 g/cm³ 和 1.0 g/cm³。

参数的选取以 $R_o 0.5\%$ 作为烃源岩干酪根开始降解生烃的原始状态, 主要生烃过程结束于 $R_o 2.0\%$ 。正常压实情况下, 岩石的孔隙度 Φ 与埋深呈指数关系^[11,16]。

3.2 生排烃过程 TOC 值的变化规律

各项参数确定之后, (6) 式即可计算出整个生排烃过程中烃源岩的有机碳(TOC%)损失情况。由(6)式可见, 用有机碳(TOC%)的损失率 $\text{DTOC} = (\text{TOC}^0 - \text{TOC})/\text{TOC}^0$ 来衡量地史过程中烃源岩有机碳含量的变化时, 其变化的幅度和方向取决于源岩中有机部分和无机部分的损耗量及相对大小, 当岩石类型和成熟演化历史一定时, 有机碳含量的变化只与生排烃效率有关。

以碎屑岩为例, 假设原始 TOC^0 的取值介于 0.1%~6%之间, 烃源岩成熟演化范围在 $R_o 0.5\%$ ~2%之间, 分别考察了生烃降解率分别为 800 mg·烃/g·有机碳、502.9 mg·烃/g·有机碳、348.2 mg·烃/g·有机碳、193.5 mg·烃/g·有机碳和 97.2 mg·

烃/g·有机碳的五种不同类型有机质,在排烃效率的取值介于10%~90%之间的TOC值变化规律。

对于同一有机质类型的烃源岩,尽管假设 TOC^0 从0.1%到6.0%变化,但D_{TOC}却基本上未体现出差异,即TOC的变化率与其原始有机质丰度无关(图4)。当排烃效率在10%~90%的范围内变化时,D_{TOC}随成熟度而变化的曲线如图5所示。结果表明,当烃源岩生排烃效率很低时,D_{TOC}都为负值,即其成熟演化过程TOC是增加的。随着生排烃效率提高,有机碳变化率D_{TOC}逐渐增加(TOC损失率增大),烃源岩逐步由“增碳”进程转变为“减碳”进程。对Ⅱ型有机质的烃源岩来说,成熟演化过程到底是“增碳”还是“减碳”,还要视其排烃效率而定,而且增减碳的幅度不会很大(图5b)。只有生烃潜力很高的Ⅰ型有机质岩石,在生烃降解率和排烃效率极高的“理想”条件下,D_{TOC}的变化幅度才十分显著(图5a)。

4 实验模拟和数值模拟结果的地球化学含义

如果要把某一特定演化阶段岩石的TOC值恢复至其原始状态时的数值 TOC^0 ,则根据定义,有机质丰度恢复系数为:

$$k = \frac{1}{1 - D_{TOC}}$$

根据上式和图5可知,当排烃效率高达到90%时,生烃降解率达到80%的Ⅰ型干酪根烃源岩,有机碳恢复系数 k 最高为2.5;生烃降解率30%左右的Ⅱ型干

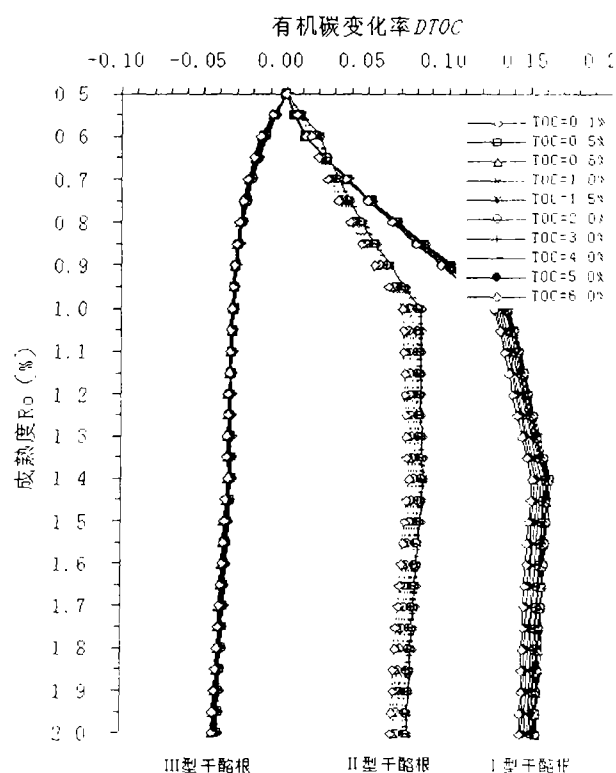
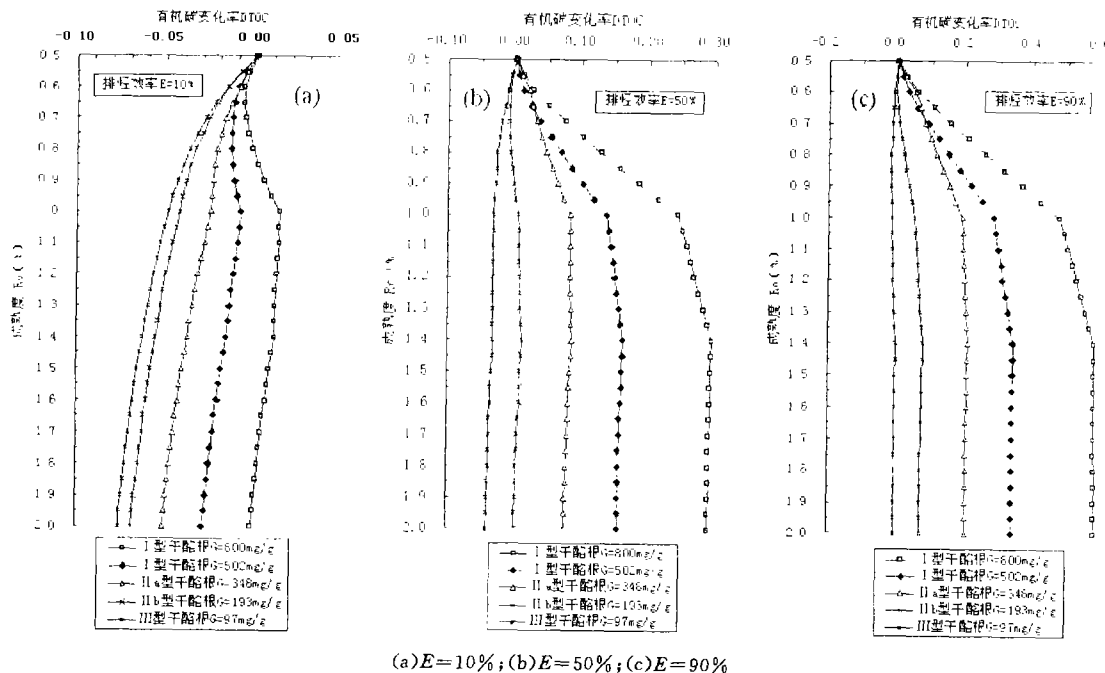


图4 有机碳变化率与原始有机质丰度关系
(取排烃效率 $E=50\%$)

Fig. 4 Relationship between organic carbon changing rate and primary organic abundance

酪根烃源岩,有机碳恢复系数 $k \approx 0.95 \sim 1.25$;生烃降解率10%左右的Ⅲ型干酪根烃源岩,有机碳恢复系数 $k \approx 0.90 \sim 1.0$ 。

诚然,上述关系是基于碎屑岩正常生排烃过程(即



(a) $E=10\%$; (b) $E=50\%$; (c) $E=90\%$

图5 干酪根类型对有机碳变化率的影响

Fig. 5 Influence of kerogen types on the changing rate of organic carbon

岩石的正常成岩压实作用过程)的物质平衡确定的。对于碳酸盐岩烃源岩的情形,一方面,其有机质类型多为Ⅱ型,甚至为Ⅲ型^[17,18],生烃的效率不是特别高;另一方面,碳酸盐岩在生排烃作用过程中可能导致岩石质量损耗的成岩作用主要有压实作用和压溶作用^[16]。压溶作用导致岩石体积的大量减少可能起主要作用,它所形成的缝合线就是无机流体损失的标志(图6)。据估计压溶作用可以导致碳酸盐岩岩石体积减少5%~40%^[16,19~21]。碳酸盐岩缝合线中的残余有机碳含量远高于周围的岩石,即是压溶作用导致的“增碳”进程的结果。换言之,尽管目前还不能够象对碎屑岩那样,建立起碳酸盐岩 TOC 变化的精确数值模型,但是从碳酸盐岩有机质类型和成岩作用特点来看,无论如何它在生烃演化历史过程中的“减碳”进程也不会很显著。

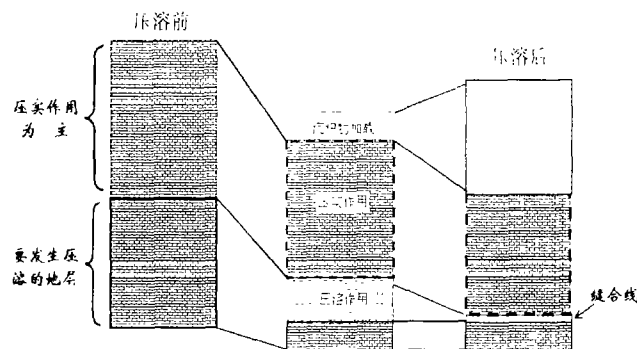


图6 碳酸盐岩压溶作用示意

Fig. 6 Sketch map showing pressure dissolution of carbonate rock

由于烃源岩的 TOC 值变化取决于其生、排烃效率,因而对于我国高一过成熟碳酸盐岩烃源岩评价中,确定有机质丰度下限是否需要原始有机碳恢复的问题,应从自然条件下烃源岩的生、排烃效率来考虑。在自然条件下地质体中的烃源岩的生、排烃效率(生烃效率×排烃效率)要比实验室条件下低得多,对Ⅱ型有机质来说,有机碳恢复的方向(恢复系数 k 大于1抑或小于1)和幅度还要视其排烃效率而定,而且恢复的幅度不大。只有生烃潜力很高的Ⅰ型有机质,在生烃降解率和排烃效率极高的“理想”条件下,DTOC 的变化幅度之大才使得恢复原始有机碳成为必要。以往进行有机质原始丰度的恢复计算,忽略了 TOC 值变化与生排烃效率的关系,因而过分强调了“减碳”的进程,很多情形下可能会美化原本比较差的烃源岩。

5 结语

烃源岩 TOC 的数值变化受到有机物质和岩石无机物质两个方面因素的影响,因此,生排烃作用过程中烃源岩的有机质损耗不能等同于其 TOC 值降低。本

文的实验结果启示我们,TOC 值的变化要置于烃源岩生排烃过程的有机-无机物质平衡关系中讨论。

当岩石类型和成熟演化历史一定时,有机碳含量的变化只与生排烃效率有关。烃源岩在热演化过程中表现为“增碳”进程抑或是“减碳”进程受其生、排烃效率的控制。当烃源岩生、排烃效率很低时,其 TOC 的变化率 DTOC 都为负值,即在成熟演化过程中烃源岩的 TOC 是增加的。只有生烃潜力很高的Ⅰ型有机质岩石,在生烃降解率和排烃效率极高的“理想”条件下,才表现为明显的 DTOC 增长(“减碳”进程),而且这种情形 DTOC 的变化幅度之大才使得恢复原始有机碳成为必要。

在地质体中的烃源岩生、排烃效率条件下,生、排烃作用不会造成 TOC 值的明显降低,因此,基于有机质原始丰度恢复的碳酸盐岩烃源岩评价标准,可能过分强调了“减碳”的进程,忽略了 TOC 值变化与生排烃效率的关系,很多情形下可能会美化原本比较差的烃源岩。

参考文献(References)

- 程克明,王兆云. 高成熟和过成熟海相碳酸盐岩生烃条件评价方法研究. 中国科学(D辑),1996,26(6):537~543
- 郝石生,高岗,王飞宇,等. 高过成熟海相烃源岩. 北京:石油工业出版社,1996
- 刘宝泉,梁狄刚,方杰,等. 华北地区中上元古界、下古生界碳酸盐岩有机质的成熟度与找油远景. 地球化学,1985,14(2):150~162
- 夏新宇,洪峰,赵林. 烃源岩生烃潜力的恢复探讨—以鄂尔多斯盆地奥陶统碳酸盐岩为例. 石油与天然气地质,1998,19(4):307~312
- 钟宁宁,张枝焕. 石油地球化学进展. 北京:石油工业出版社,1998
- 夏新宇. 碳酸盐岩生烃与长庆气田气源. 北京:石油工业出版社,2000. 60~87
- 梁狄刚,张水昌,张宝民,等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题. 地质前缘,2000,7(4):534~546
- 张水昌,梁狄刚. 关于古生界烃源岩有机质丰度的评价标准. 石油勘探与开发,2002,29(2):8~12
- 钟宁宁,卢双舫,黄志龙,等. 烃源岩生烃演化过程 TOC 的值演变及其控制因素. 中国科学(D辑),2004,待刊
- 黄志龙,钟宁宁,张四海. 碳酸盐岩与泥质岩生气规律对比研究. 地球化学,2003,32(1):29~34
- Tissot B P, Welte D H. Petroleum Formation and Occurrence. (Second Revised and Enlarged Edition). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1984. 160~198
- 郭立言,顾信章,盛志伟,等. 生油岩热解快速定量评价. 北京:科学出版社,1986
- Durand B, Monin J C. Elemental analysis of kerogen. In: Durand B ed. Kerogen. Paris: Technip, 1980. 113~142
- 杨万里,高瑞祺. 松辽盆地陆相油气生成、运移和聚集. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1985
- 卢双舫,赵锡刚,黄第藩,等. 煤成烃生成和运移的模拟实验研究

1. 气态和液态产物特征及其演化. 石油实验地质, 1994, 16(3): 290~303
- 16 Hunt J M. Petroleum Geochemistry and Geology. W H Freeman and Company, San Francisco, 1979
- 17 Ferguson J. Oil generation and migration within marine carbonate sequences- a review. Journal of Petroleum Geology, 1988, 11(4): 389~402
- 18 钟宁宁, 秦勇. 碳酸盐岩有机岩石学. 北京: 科学出版社, 1995
- 19 Stockdale P B. Stylolites: their nature and origin. Indiana University Studies, 1922, (9): 1~97
- 20 Mossop G D. Origin of the peripheral rim, Redwater Reef, Alberta. Bull. Canadian Petroleum Geol, 1972, 20: 238~280
- 21 Dunnington H V. Aspects of diagenesis and shape change in stylolitic limestone reservoirs. In: 7th World Petroleum Congress, Proc. 2, London: Elsevier, 1967. 339~352

An Approach to the Evolution of TOC Value for Source Rock and Its Relation to Efficiencies of Hydrocarbon Generation and Expulsion

ZHONG Ning-ning¹ LU Shuang-fang² HUANG Zhi-long¹
ZHANG You-sheng¹ XUE Hai-tao²

1(The Key Lab for Mechanism of Petroleum Accumulation of the State Education Ministry, Petroleum University, Beijing 102249)

2(Department of Geoscience, Daqing Petroleum Institute, Daqing Heilongjiang 163000)

Abstract Pyrolysis and numeric modeling techniques were adopted to reveal the loss rate of total organic carbon content (TOC) with source rock maturation process. The TOC loss rate was presented as $DTOC = (TOC^0 - TOC) / TOC^0$. While source rock is of lower efficiencies of hydrocarbon generation and exclusion, the DTOC is a negative value, i. e. in this case the TOC value mount up with maturation progress. With increase in efficiencies of hydrocarbon generation and exclusion, DTOC goes up gradually, i. e. TOC loss rate increases and source rock therefore change its TOC evolution path from a "carbon adding" process to a "carbon reduction" process. There is only the type I kerogen source rock that under the ideal condition of extremely high efficiencies of hydrocarbon generation and exclusion the range of DTOC increase ("carbon adding" process) could be significant. It is evident that the criteria of carbonate source rock which bases on the recovery of original TOC value is likely an overestimate of "carbon reduction" process. Thus, in many cases, it would sugar up originally poor source rock.

Key words source rock appraisal, organic matter abundance, TOC value, efficiencies of hydrocarbon generation and expulsion