

文章编号: 1000-0550(2007) 05-0782-05

# 碳酸盐岩油源岩有机质丰度分级评价标准

薛海涛<sup>1</sup> 王欢欢<sup>1</sup> 卢双舫<sup>1</sup> 钟宁宁<sup>2</sup>

(1 大庆石油学院 黑龙江大庆 163318; 2 中国石油大学(北京) 北京 102200)

**摘要** 碳酸盐岩油源岩分级评价标准研究具有重要的理论和实际意义。以塔里木、渤海湾、鄂尔多斯盆地地质参数(地层、地史、热史)为例分别计算了不同地质条件下单位面积碳酸盐岩的生油量及源岩和围岩的残留油量,进而根据物质平衡原理(排油量 = 生油量 - 残油量)计算出排油量,以排油量为指标给出划分油源岩分级评价的标准,并计算出其对应的有机质丰度。模拟计算显示油源岩有机质丰度工业下限值  $TOC_{gs}$  随源岩厚度的增加而减小;随成熟度的增加先减小后增加;随有机质类型(生烃潜力)的变好而减小,碳酸盐岩油源岩评价标准随地质条件的不同变化很大。建立了塔里木、渤海湾、鄂尔多斯盆地碳酸盐岩油源岩的分级评价表。经过分析综合,归纳出我国碳酸盐岩沉积区有机质类型为型的成熟油源岩“非、无效、差、中、好”各级对应的  $TOC$  界限值分别为“0.25、0.5、0.8、1.5”。

**关键词** 碳酸盐岩 油源岩 有机质丰度 物质平衡原理 分级评价

**第一作者简介** 薛海涛 男 1975 年出生 副教授 博士 油气地球化学 E-mail: sea1999101@sina.com

**中图分类号** TE155 **文献标识码** A

碳酸盐岩中的石油储量占世界石油储量的 40%。在我国,碳酸盐沉积岩分布面积占陆上国土面积的 1/3 具有沉积厚度大、贫有机质和高成熟度的特点。与泥质烃源岩相比,碳酸盐岩油源岩有机质丰度评价标准的研究还很薄弱。关于碳酸盐岩油源岩有机质丰度工业下限值  $TOC_{gs}$  的研究国内学者都做了一些工作<sup>[1-4]</sup>,但彼此的研究结果相去甚远,从 0.1% 到 0.5% 的都有,分级评价标准的研究更是鲜有报道。

选用不同的有机质丰度分级评价标准,在厘定烃源岩品质、厚度和分布面积时会有很大差异,这将直接影响资源评价结果<sup>[5]</sup>。因此说,碳酸盐岩油源岩分级评价标准研究是对勘探决策有重要影响的基础性研究课题,具有重要的理论和实际意义。

本文以塔里木盆地塔中 12 井、渤海湾盆地车 25 井、鄂尔多斯盆地陕参 1 井地质参数(地层、地史、热史)为例,分别计算了不同地质条件下单位面积碳酸盐岩的生油量及源岩和围岩的残留油量,进而根据物质平衡原理(排油量 = 生油量 - 残油量)计算出排油量,以排油量为指标给出划分油源岩分级评价的标准,并计算出其对应的有机质丰度。分析计算结果,探讨了碳酸盐岩油源岩有机质丰度工业下限的主要影响因素。建立了塔里木、渤海湾、鄂尔多斯盆地碳酸盐岩油源岩的分级评价判别表。

## 1 模型

### 1.1 生油量计算模型

应用有机质成烃动力学模型计算油气生成量<sup>[6]</sup>。根据有机质成油及油成气动力学参数<sup>[7]</sup>结合研究区源岩所经历的沉积埋藏史和热史,即可定量计算源岩在任一时刻干酪根初次裂解成油的量和油二次裂解成气的量,并进一步计算出净生油量如下:

$$\text{净生油量} = \text{干酪根成油量} - \text{油成气消耗油量}$$

### 1.2 烃源岩残留液态烃模型

本文统计了塔里木盆地 3 664 个岩石样品的残留烃( $S_1$ )数据,根据数学地质统计分析方法拟合出残留油临界饱和和量  $S_o$  (mg/g) 与成熟度  $R_o$  (%) 的关系式如下:

$$S_o = a - b \cdot e^{-cR_o^d} \quad (1)$$

式中各系数见表 1。

表 1 残留油临界饱和和量与成熟度关系式参数表

Table 1 Parameters of relation between irreducible oil critical saturation capacity and maturity

系数	a	b	c	d
当 $R_o \leq 0.9$ 时	1.4844	1.2417	10.9481	6.3205
当 $R_o > 0.9$ 时	1.4747	1.5089	4.2503	-4.3500

由式 1 所得的残留油饱和量和没有考虑有机质丰度的影响。通过对不同 TOC 分布段的残留油饱和量进行研究, 建立了不同 TOC 时的校正系数  $C$  (见式 2)。实际应用时, 在式 1 的基础上乘以系数  $C$  即可。

$$C = 0.3321 \cdot TOC^{0.4024} \quad (2)$$

渤海湾、鄂尔多斯盆地的残留烃量亦以成熟度  $R_o$  为桥梁, 通过式 (1) 进行计算。

以塔里木盆地塔中 12 井、渤海湾盆地车 25 井、鄂尔多斯盆地陕参 1 井的基础地质参数为例, 分别根据化学动力学模型和残留液态烃模型计算了不同地质条件下 (厚度不同、顶面埋深不同、有机质类型不同) 源岩的净油量、残留油临界饱和量, 进而根据物质平衡原理计算出排油量。

## 2 碳酸盐岩油源岩有机质丰度工业下限的影响因素

### 2.1 源岩厚度对油源岩有机质丰度下限的影响

通过对有机质类型 (生烃潜力,  $HI$ ) 和成熟度 (这里用源岩顶面埋深  $Z_{dn}$  表示) 相同条件下碳酸盐岩油源岩厚度与有机质丰度工业下限 ( $TOC_{gy}$ ) 的分析, 揭示了油源岩  $TOC_{gy}$  随油源岩厚度  $H_{yy}$  的增大而减小。以塔里木盆地为例: 在  $HI = 500 \text{ mgHC/gC}$ ,  $Z_{dn} = 4500 \text{ m}$  的条件下, 随着厚度的不断增加, 有机碳丰度下限由原来的 1.29 减小到 0.44 (图 1)。而且厚度较小时, 下限值的变化幅度较大。厚度由 50 m 变化到 100 m,  $TOC$  由 1.29 变化到 0.82 而厚度由 200 m 变化到 500 m 时,  $TOC$  由 0.58 只变化到 0.44。

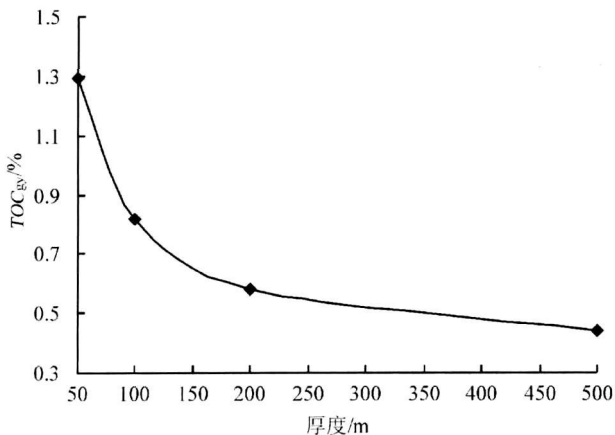


图 1 塔里木盆地油源岩  $TOC_{gy}$  与源岩厚度的关系  
( $Z_{dn} = 4500 \text{ m}$ ,  $HI = 500 \text{ mg/g}$ )

Fig 1 Relationship between  $TOC_{gy}$  and thickness of oil source rock in Tarim basin ( $Z_{dn} = 4500 \text{ m}$ ,  $HI = 500 \text{ mg/g}$ )

### 2.2 有机质类型对油源岩有机质丰度下限的影响

有机质类型在此由原始生烃潜力  $HI$  ( $\text{mg/g}$ ) 来反映,  $HI$  相当于原始氢指数。图 2 (以塔里木盆地为例) 表明, 有机质丰度下限值随着有机质生烃潜力的增大而减小, 有机质类型较差时 (生烃潜力较小时), 影响的幅度较大, 有机质类型较好时, 影响的幅度较小。对于生烃潜力小于  $200 \text{ mg/g}$  的源岩 (煤岩除外) 是不大可能成为油源岩的。如  $HI$  从  $200 \text{ mgHC/gC}$  到  $300 \text{ mgHC/gC}$  时, 下限值从  $TOC = 11.55\%$  降到  $TOC = 3.45\%$ , 降幅接近 70%; 而  $HI$  从  $700 \text{ mgHC/gC}$  到  $900 \text{ mgHC/gC}$  时, 下限值从  $TOC = 0.37\%$  降到  $TOC = 0.26\%$ , 降幅为 30%。

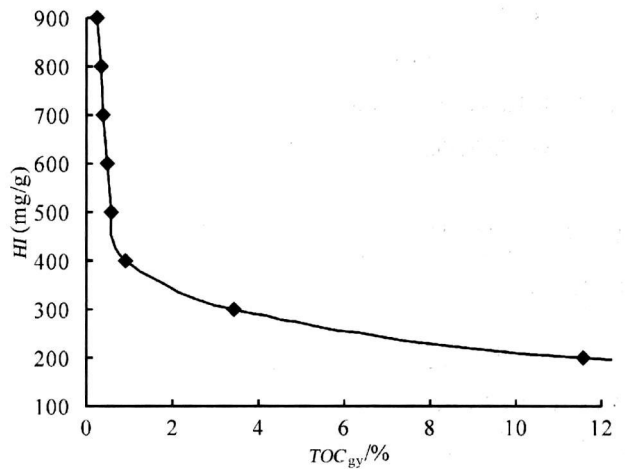


图 2 塔里木盆地油源岩  $TOC_{gy}$  与生烃潜力的关系  
( $Z_{dn} = 4500 \text{ m}$ ,  $H_{yy} = 200 \text{ m}$ )

Fig 2 Relationship between  $TOC_{gy}$  and hydrocarbon potential of oil source rock in Tarim basin ( $Z_{dn} = 4500 \text{ m}$ ,  $H_{yy} = 200 \text{ m}$ )

### 2.3 碳酸盐岩油源岩顶面埋深对有机碳丰度下限的影响

图 3 (以塔里木盆地为例) 绘出了碳酸盐岩油源岩在不同顶面埋深 (成熟度) 条件下的有机质丰度下限的变化规律。有机质丰度工业下限值在油源岩埋深较浅 ( $< 4000 \text{ m}$ ) 和较深 ( $> 6000 \text{ m}$ , 此值随源岩层厚度变化而略有变化) 时都很大。在  $4000 \sim 6000 \text{ m}$  之间则比较小, 而且变化不大。这是因为在  $4000 \text{ m}$  以浅, 油源岩的净油率较小, 生成油量不足, 因此  $TOC_{gy}$  较大; 在  $6000 \text{ m}$  以深, 油开始大量裂解成气, 净油率开始下降, 因此  $TOC_{gy}$  也较大。

上述研究表明, 碳酸盐岩油源岩评价标准随地质条件 (源岩厚度、有机质类型、成熟度) 的不同变化很大, 不适合用一套统一的评价标准来评价油源岩。

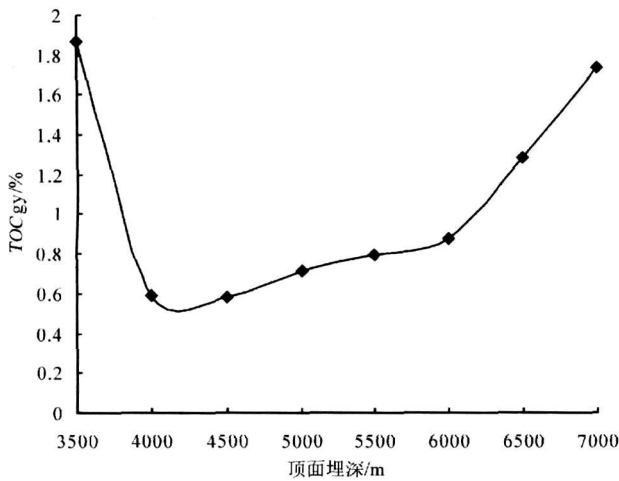


图 3 塔里木盆地顶面埋深对油源岩  $TOC_{ey}$  的影响

$$(HI = 500 \text{ mg/g} H_{yy} = 200 \text{ m})$$

Fig 3 Influence of cap face buried depth on  $TOC_{ey}$  of oil source rock in Tarim basin ( $HI = 500 \text{ mg/g} H_{yy} = 200 \text{ m}$ )

### 3 碳酸盐岩油源岩有机质丰度分级评价标准

目前以排烃强度大小为标准判断烃源岩的品质还没有一个公认的标准。程克明等<sup>[8]</sup>对我国 38 个陆相沉积盆地的生烃强度进行了比较研究,提出了沉积盆地含油气性的分类方案:平均生烃强度  $> 2 \text{ Mt/km}^2$  的可获特大、大型油田;  $1 \sim 2 \text{ Mt/km}^2$  的可获中小型油气田;  $0.5 \sim 1 \text{ Mt/km}^2$  的只能获小型油田;  $< 0.5 \text{ Mt/km}^2$  的属非工业油流盆地。本文通过上述标准,根据物质平衡原理(排油强度 = 生油强度 - 残油强度),经过分析综合(参阅了我国二轮资评、CNPC 三轮资评的大量资料)得到各级别所对应的排油强度,见表 2。以“好烃源岩”级别为例,松辽盆地<sup>[9]</sup>成熟源岩平均厚度约为 200 m,平均生烃强度为  $2.0 \text{ Mt/km}^2$ ,据式(1)计算得到其平均残油强度约为  $0.5 \text{ Mt/km}^2$ ,计算可得有效排油强度为  $1.5 \text{ Mt/km}^2$ (即  $1.500 \times 10^6 \text{ kg/km}^2$ )。其中,“无效”这一级别表示该目标层有一定的排油能力,但排油强度还不足以满足独立成藏的要求,即介于理论下限(即排油强度等于零)和工业下限(排油强度大到可以聚集成藏,本文定为  $200 \times 10^6 \text{ kg/km}^2$ )之间的源岩。这类油源岩需要多套配合才能成藏,或为其他油源提供有益的补充。

根据表 2 给出的标准,计算出相应界限所对应的  $TOC$ ,分别建立了塔里木、渤海湾、鄂尔多斯盆地适当深度油源岩有机质丰度分级评价标准判别表(见表

3 表 4 表 5)。

表 2 以排油强度为指标的油源岩分级评价标准

Table 2 Classification evaluation criterion of oil source rock regarding the oil expulsion intensity as evaluating indicator

源岩级别	非	无效	差	中	好
排油强度 / ( $\times 10^6 \text{ kg/km}^2$ )	$< 0$	0~200	200~500	500~1500	$> 1500$

表 3 塔里木盆地油源岩有机质丰度分级评价标准

$$(Z_{dm} = 4500 \text{ m})$$

Table 3 Classification evaluation criterion of organic carbon content of oil source rock in Tarim basin ( $Z_{dm} = 4500 \text{ m}$ )

级 别	生烃潜力 $HI / \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	烃源岩厚度 $h_m$			
		50	100	200	500
非	800	$< 0.15$	$< 0.15$	$< 0.16$	$< 0.18$
	500	$< 0.23$	$< 0.24$	$< 0.26$	$< 0.29$
无效	800	0.15~0.64	0.15~0.42	0.16~0.31	0.18~0.25
	500	0.23~1.29	0.24~0.82	0.26~0.58	0.29~0.44
差	800	0.64~1.29	0.42~0.77	0.31~0.51	0.25~0.34
	500	1.29~2.69	0.82~1.57	0.58~0.99	0.44~0.63
中	800	1.29~3.33	0.77~1.85	0.51~1.1	0.34~0.62
	500	2.69~7.12	1.57~3.9	0.99~2.27	0.63~1.23
好	800	$> 3.33$	$> 1.85$	$> 1.1$	$> 0.62$
	500	$> 7.12$	$> 3.9$	$> 2.27$	$> 1.23$

表 4 渤海湾盆地油源岩有机质丰度分级评价标准

$$(Z_{dm} = 3500 \text{ m})$$

Table 4 Classification evaluation criterion of organic carbon content of oil source rock in Bohai Bay basin ( $Z_{dm} = 3500 \text{ m}$ )

级 别	生烃潜力 $HI / \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	烃源岩厚度 $h_m$			
		50	100	200	500
非	800	$< 0.15$	$< 0.16$	$< 0.17$	$< 0.17$
	500	$< 0.18$	$< 0.18$	$< 0.19$	$< 0.19$
无效	800	0.15~0.54	0.16~0.37	0.17~0.29	0.17~0.23
	500	0.18~0.99	0.18~0.63	0.19~0.45	0.19~0.32
差	800	0.54~1.05	0.37~0.66	0.29~0.45	0.23~0.31
	500	0.99~2.1	0.63~1.21	0.45~0.78	0.32~0.49
中	800	1.05~2.4	0.66~1.51	0.45~0.93	0.31~0.55
	500	2.1~5.5	1.21~3	0.78~1.79	0.49~1
好	800	$> 2.4$	$> 1.51$	$> 0.93$	$> 0.55$
	500	$> 5.5$	$> 3$	$> 1.79$	$> 1$

经过分析综合, 归纳出塔里木盆地具有一般意义的(Ⅰ型有机质, 成熟碳酸盐岩)碳酸盐岩油源岩有机质丰度分级评价标准(见表 6)。

表 5 鄂尔多斯盆地油源岩有机质丰度分级评价标准  
( $Z_{dm} = 2000m$ )

Table 5 Classification evaluation criterion of organic carbon content of oil source rock in Ordos basin ( $Z_{dm} = 2000m$ )

级 别	生烃潜力 $H I/mg \cdot g^{-1}$	烃源岩厚度 /m			
		50	100	200	500
非	800	< 0.15	< 0.14	< 0.14	< 0.13
	500	< 0.32	< 0.31	< 0.31	< 0.28
无效	800	0.15~0.71	0.14~0.44	0.14~0.3	0.13~0.2
	500	0.32~1.24	0.31~0.81	0.31~0.57	0.28~0.4
差	800	0.71~1.44	0.44~0.84	0.3~0.51	0.2~0.3
	500	1.24~2.45	0.81~1.45	0.57~0.92	0.4~0.56
中	800	1.44~3.75	0.84~2.05	1~1.16	0.3~0.6
	500	2.45~6.2	1.45~3.4	0.92~1.98	0.56~1.05
好	800	> 3.75	> 2	> 1.16	> 0.6
	500	> 6.2	> 3.4	> 1.98	> 1.05

表 6 塔里木盆地碳酸盐岩油源岩有机质丰度分级评价标准  
Table 6 TOC classification evaluation criterion of carbonate oil source rock in Tarin basin

油源岩级别	非	无效	差	中	好
TOC 标准	< 0.25	0.25~0.5	0.5~0.8	0.8~1.5	> 1.5

## 4 结论

碳酸盐岩油源岩有机碳工业下限值随源岩厚度的增大而减小, 尤其是厚度较小时, 影响比较大; 下限值开始时随埋深(成熟度)的增大而减小, 之后再增大。因此, 油源岩埋藏的过深和过浅(成熟度过高和过低)都是不利的; 下限值随着有机质生烃潜力的增大而减小, 有机质类型较差(即生烃潜力较小)时, 影响的幅度较大, 有机质类型较好时, 影响的幅度较小。

初步建立了塔里木盆地碳酸盐岩沉积区有机质丰度分级评价标准判别图版, 经过分析综合, 归纳出塔里木盆地有机质类型为Ⅰ型的成熟油源岩“非、无效、差、中、好”各级对应的 TOC 界限值分别为“0.25、0.5、0.8、1.5”。

## 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 [Cheng Keming Wang Zhaoyun. Study of evaluation methods of the hydrocarbon-generating conditions of high mature and overmature marine carbonate rocks. Science in China (Series D), 1996, 26(6): 537-543]
- 戴金星, 秦胜飞, 陶士振, 等. 中国天然气工业发展趋势和天然气地质理论重要进展. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 127-142 [Dai Jinxing Qin Shengfei Tao Shizhen, et al. Developing trends of natural gas industry and the significant progress on natural gas geological theories in China. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(2): 127-142]
- 秦建中, 刘宝泉, 国建英, 等. 关于碳酸盐烃源岩的评价标准. 石油实验地质, 2004, 26(3): 281-286 [Qin Jianzhong Liu Baoquan Guo Jianying, et al. Discussion on the evaluation standards of carbonate source rocks. Petroleum Geology & Experiment, 2004, 26(3): 281-286]
- 钟宁宁, 卢双舫, 黄志龙, 等. 烃源岩 TOC 值变化与其生排烃效率关系的探讨. 沉积学报, 2004, 22(增刊): 73-78 [Zhong Ningning Lu Shuangfang Huang Zhilong, et al. An approach to the evolution of TOC value for source rock and its relation to efficiencies of hydrocarbon generation and expulsion. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(Supplement): 73-78]
- 张水昌, 梁狄刚, 张大江. 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 [Zhang Shuchang Liang Digan Zhang Dajiang. Evaluation criteria for Paleozoic effective hydrocarbon source rocks. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 8-12]
- 卢双舫. 有机成烃动力学理论及其应用. 北京: 石油工业出版社, 1996, 16-67 [Lu Shuangfang. Chemical Kinetic Theory of the Hydrocarbon Generation by Organic Matter and Its Initial Application. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996, 16-67]
- 薛海涛, 卢双舫, 钟宁宁. 碳酸盐岩气源岩有机质丰度下限研究. 中国科学(D辑), 2004, 34(S1), 127-133 [Xue Haitao Lu Shuangfang Zhong Ningning. Study on the threshold value of organic enrichment of carbonate as gas source rocks. Science in China (Series D), 2004, 34(S1): 150-158]
- 程克明, 王铁冠, 钟宁宁. 烃源岩地球化学. 北京: 科学出版社, 1995, 249-252 [Cheng Keming Wang Tieguan Zhong Ningning. Geochemistry of Hydrocarbon Source Rocks. Beijing: Science Press, 1995, 245-252]
- 大庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷二大庆油田). 北京: 石油工业出版社, 1993, 79-205 [Daqing Petroleum Geology Summary Compilation Group. China Petroleum Geology Summary. The Second Volume (Daqing Oilfield). Beijing: Petroleum Industry Press, 1993, 79-205]

## Standard Related to *TOC* Classification Evaluation of Carbonate Oil Source Rocks

XUE Hai-tao<sup>1</sup> WANG Huan-huan<sup>1</sup> LU Shuang-fang<sup>1</sup> ZHONG Ning-ning<sup>2</sup>

(1 Daqing Petroleum Institute, Daqing Heilongjiang 163318; 2 China University of Petroleum, Changping Beijing 102200)

**Abstract** The study of evaluation criterion of carbonate oil source rocks is a basic research subject which has significant influences on exploratory decision and has important theoretical and practical value. In this paper, calculations have been performed about amount of oil generation, remained oil of unit area carbonate rocks at different geologic conditions by the parameters (strata geohistory, and thermal history) in Tarim basin, Bohai Bay basin, and Ordos basin. According to the material balance principle, oil-expulsion amount has been worked out (oil-expulsion amount = amount of oil-generation - amount of remained oil). We regard it as an index to present the classification evaluation of oil source rocks, figure out the corresponding organic enrichment, and establish the classification evaluation tables of carbonate oil source rocks in Tarim basin, Bohai Bay basin, and Ordos basin. Based on the simulating calculation, find that *TOC* industrial threshold value ( $TOC_{gy}$ ) decreases with the increasing source rocks thickness, decreases at first and then increases with the increasing maturity and decreases with the better type of organic matter. Investigations indicate that the evaluation Standard of carbonate oil source rocks have great variance with the differences of geologic conditions. Based on the analysis, we induce the threshold values *TOC* are "0.25, 0.5, 0.8, 1.5", which correspond with the classes "non-effective, poor, moderate and good source rocks" of mature carbonate oil source rocks whose organic matter type is .

**Key words** carbonate rocks, oil source rock, organic matter abundance, material balance principle, grading evaluation