

# 松辽盆地北部青山口组烃源岩含油性分析

曾维主<sup>1,2</sup>, 宋之光<sup>1\*</sup>, 曹新星<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 对松辽盆地青山口组烃源岩钻井岩芯样品的岩石热解参数和可溶有机质含量等实测数据开展了研究, 结果如下: ①统计结果表明, 烃源岩自由烃  $S_1$  含量在 0.86~2.9 mg/g 之间(平均值为 1.6 mg/g), 可溶有机质含量在 6.6~14 mg/g 之间(平均值为 9.5 mg/g), 显示较高的含油率; ②相关关系研究表明, 自由烃  $S_1$  含量和可溶有机质含量两项指标, 总体上受有机质丰度、成熟度和排烃作用的影响, 随有机碳含量 TOC 和成熟度的增加, 含油率呈现一定的增加趋势, 排烃作用使含油率明显下降, 但不改变含油率随深度不断增加的总趋势; ③综合评价结果表明, 若以热解参数  $S_1$  (0.79 mg/g)作为页岩含油率的下限参数值来评价该区页岩油资源潜力, 松辽盆地晚白垩世青二三段底部及青一段都具备一定的页岩油资源潜力。

**关键词:** 湖相烃源岩; 游离烃含量; 含油性评价; 白垩系青山口组; 松辽盆地

中图分类号: P593; P618.13 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2018)04-0345-09

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2018.04.003

## Oil potential of Qingshankou Formation source rocks in northern Songliao Basin

ZENG Wei-zhu<sup>1,2</sup>, SONG Zhi-guang<sup>1\*</sup> and CAO Xin-xing<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Analysis of the pyrolysis parameters and soluble organic matter content of Qingshankou Formation source rocks from the Songliao Basin shows that (1) the source rocks show a high shale oil potential, as the free hydrocarbon content  $S_1$  is in the range of 0.86–2.9 mg/g, with an average of 1.6 mg/g, and the soluble organic matter content is between 6.6 and 14 mg/g, with an average of 9.5 mg/g; (2) the free hydrocarbon content  $S_1$  and soluble organic matter content of these source rocks are correlated with the total organic matter content, maturity, and hydrocarbon expulsion. With increasing TOC content and maturity, the oil content displays an overall increasing trend. Although hydrocarbon expulsion resulted in a clear decrease in the oil content of the source rocks, it did not alter the overall increasing trend of the oil content with increasing burial depth; (3) if we take the free hydrocarbon content  $S_1$  as the lowest oil content of the source rocks and an  $S_1$  value of 0.79 mg/g as the threshold of the oil content for appraising shale oil resources in this area, the lower part of members 2 and 3 and the entire section of member 1 of the Qingshankou Formation have potential for shale oil exploitation.

**Key words:** lacustrine source rocks; free hydrocarbon content; oil potential assessment; Cretaceous Qingshankou Formation; Songliao Basin

## 0 引言

随着常规油气资源的不断枯竭, 非常规页岩油

气资源已成为当今世界油气勘探开发的重要领域。页岩油气是指残留于富有机质泥页岩中的石油和天然气<sup>[1-3]</sup>。美国页岩油气勘探开发的成功实践, 不仅深刻改变了世界能源供给格局, 也推动了全球页岩

收稿日期(Received): 2017-05-15; 改回日期(Revised): 2017-07-18; 接受日期(Accepted): 2017-11-05

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(41621062)

作者简介: 曾维主(1989-), 男, 硕士研究生, 有机地球化学专业。E-mail: zengweizhu@gig.ac.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): SONG Zhi-guang, E-mail: zsong@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85290861

油气研究的热潮<sup>[4-9]</sup>。国内在有关页岩气资源评价研究和勘探开发方面已有大量研究报道,并已进入实质性勘探开发阶段<sup>[10-13]</sup>。相比而言,页岩油的研究相对滞后,很多研究工作尚处于起步阶段<sup>[14-15]</sup>。页岩油的形成和储集机理与页岩气有本质的区别,因此其资源量评价方式也完全不同。古生界页岩在中国南方广泛分布,但其过高的成熟度和复杂的地质演化历史已不适合页岩油的产出与保存,而中生代陆相沉积盆地发育的富含有机质泥页岩地层,其相对较低的成熟度和稳定的地质条件有利于页岩油的发育和储集。

松辽盆地是我国最重要的含油气盆地,经过 50 余年的勘探开发,油田面临着储量产量不断缩减的困境。因此,寻找新的油气资源是油田可持续发展的迫切需求,而松辽盆地大面积发育的中生界白垩系富有机质泥页岩,为页岩油的形成与富集提供了有利条件。上白垩统青山口组底部(包括青一段及青二三段底部)的巨厚泥页岩沉积地层,是松辽盆地的主力烃源岩<sup>[16-20]</sup>,也是该盆地页岩油形成与富集的有利目标层段。据 2014 年柳波等<sup>[21]</sup>初步评估,松辽盆地北部青一段页岩油有效资源量可达  $96.41 \times 10^8$  t,而有关青二三段底部的页岩油资源潜力评价工作尚缺,需要更多的研究工作。页岩油资源评价的关键问题就是含油率的确定,而国内外有关该参数的确定还没有统一的标准。页岩油主要以游离态和吸附态两种形式赋存于泥页岩中<sup>[3,15]</sup>,能被有效开采出来的页岩油主要是以游离态形式存在的部分。已有的研究通常用热解参数  $S_1$ (自由烃含量)和氯仿沥青“A”含量分别表征残留烃与残留油含量<sup>[22]</sup>,但两者都存在明显不足。热解参数  $S_1$  所代表的自由烃是指在快速加热至 300 °C 恒温条件下岩石释放的游离烃的含量,主要为碳数介于  $C_{14} \sim C_{18}$  之间的烃类化合物<sup>[23]</sup>,与原油相比,缺损重烃、沥青和非烃部分,因而所反映的烃源岩游离烃含量会比实际含量要低。而氯仿沥青“A”所萃取的可溶有机质代表岩石中可溶于有机溶剂中的游离烃类、沥青和非烃部分及吸附态烃类,碳数分布在  $C_6 \sim C_{38}$  之间,该部分与原油组成较为接近但大分子化合物含量比原油要高<sup>[23-27]</sup>。鉴于氯仿溶剂的有毒性,现在多改用二氯甲烷/甲醇混合溶剂进行索氏抽提,得到可溶有机质含量,并以此近似代表氯仿沥青“A”含量。因此,可用自由烃  $S_1$  含量代表泥页岩含油率的下限,而可溶有机质含量  $W_A$  表示泥页岩含油率的上限,实际含油率则分布于

两者之间。

松科 1 井南孔位于松辽盆地北部的生烃凹陷中心部位,该钻孔纵贯上白垩统青山口组和嫩江组烃源岩层系,连续取芯多达 900 多米,是开展松辽盆地页岩油研究的理想钻井剖面。鉴于该盆地页岩油研究比较薄弱,尚缺乏系统性的含油性评价工作,因此本文将对松科 1 井青山口组底部约 120 m 厚的烃源岩样品的有机碳含量、岩石热解参数和可溶有机质丰度等常规地球化学资料进行分析,来综合评价青山口组底部烃源岩的含油性及其控制因素,为松辽盆地页岩油资源潜力评价提供科学依据。

## 1 样品与实验数据

松科 1 井南孔位于松辽盆地中央拗陷区齐家古龙凹陷的南端(图 1),取芯深度 950~1780 m,岩芯所代表的上白垩统地层划分及埋深见表 1。本文所研究的样品为钻井深度 1663~1780 m 的青山口组底部岩芯样品。岩芯样品大多为深灰色泥岩,具水平层理,个别层面见生物遗迹,偶见黄铁矿颗粒富集条带。样品有机碳含量由 CS-400 型有机碳分析仪测定;热解参数采用 Rock-Eval 6 plus 型岩石热解仪获取;可溶有机质使用索氏抽提法萃取,用二氯甲烷/甲醇(体积比为 9:1)混合溶剂抽提 72 h,总抽提物去除沥青质后用硅胶氧化铝层析柱进行族组分分离,分别得到饱和烃、芳烃和非烃;气相色谱-质谱分析使用 HP6890 型气相色谱仪连接 Platform II 质谱仪。具体方法与步骤可参见文献<sup>[19]</sup>。

## 2 烃源岩含油率分析

### 2.1 青山口组烃源岩含油率

青山口组烃源岩钻井样品的自由烃  $S_1$  与可溶有机质含量  $W_A$  见表 2 和表 3。自由烃  $S_1$  含量整体较高,分布较为集中,在 0.86~2.9 mg/g 之间(平均值为 1.6 mg/g),总体上随深度增加而增大。样品 SK6 自由烃  $S_1$  含量最低,从 TOC 含量和氢指数  $I_H$  来看,这可能主要受有机质类型的影响。可溶有机质含量  $W_A$  总体较高,变化幅度较大,分布于 6.6~14 mg/g 之间(平均值为 9.5 mg/g),其含量随深度增加而无明显变化。青山口组烃源岩自由烃  $S_1$  含量与可溶有机质含量  $W_A$  关系如图 2a 所示,从图中可看出两参数之间呈现较好的正相关关系,随可溶有机质含量的增高,

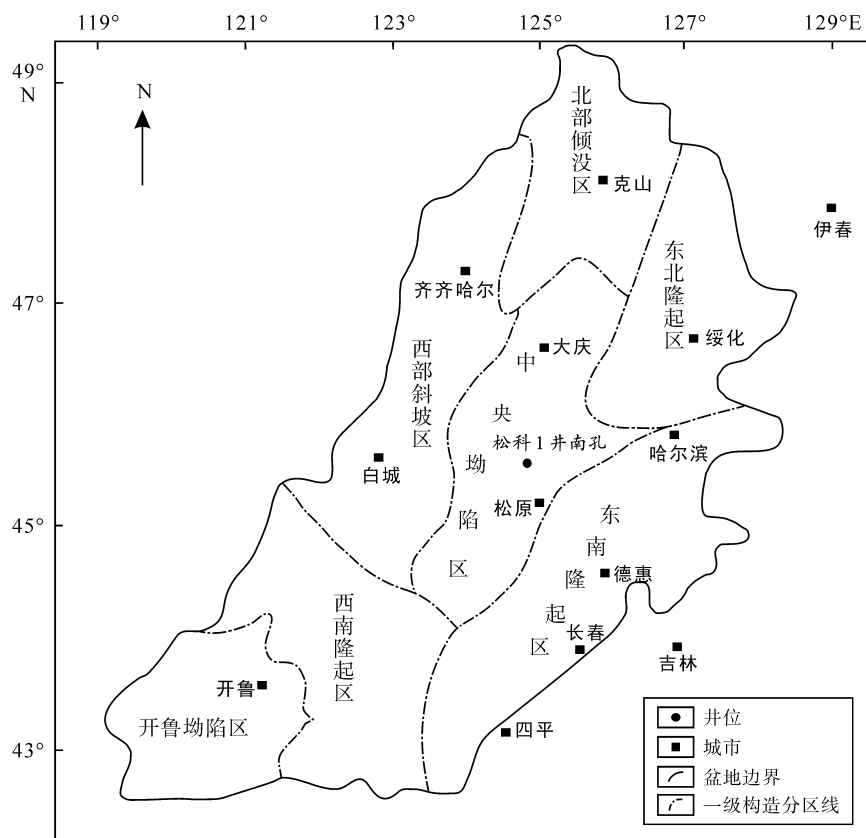


图 1 松辽盆地一级构造单元划分及松科 1 井井位(据李国玉等<sup>[28]</sup>)

Fig.1 Primary tectonic unit division and SK-1 borehole location in Songliao Basin (modified from Li *et al.*<sup>[28]</sup>)

表 1 松辽盆地松科 1 井南孔地层划分及厚度

Table 1 Stratigraphic division and thickness of the south hole of SK-1 well in Songliao Basin

地层组	层段	深度 $d$ (m)	厚度 $\delta$ (m)
嫩江组	嫩二段 $K_2n_2$	968.17~1025.13	56.96
	嫩一段 $K_2n_1$	1025.13~1128.17	103.04
姚家组	姚二三段 $K_2y_{2+3}$	1128.17~1253.47	125.30
	姚一段 $K_2y_1$	1253.47~1286.26	32.79
青山口组	青二三段 $K_2qn_{2+3}$	1286.26~1701.52	412.26
	青一段 $K_2qn_1$	1701.52~1782.93	81.41
泉头组	泉四段 $K_1q_4$	1782.93~1878.03	95.10

自由烃含量  $S_1$  也明显增加, 这表明两参数之间有一定的内在联系, 因此两者都可作为页岩油资源评价的有效参数。青山口组烃源岩自由烃含量  $S_1$  占可溶有机质含量的平均比值为 16.7%, 比可溶有机质中饱和烃的平均百分含量 22.4%稍低, 这是因为自由烃  $S_1$  主要由可溶有机质中易挥发饱和烃部分组成。而可溶有机质中的沥青质含量较高, 主要以吸附态形式存在于泥页岩中, 为无效页岩油资源。因此本文采用热解参数  $S_1$  作为页岩含油率的下限参数, 以可溶有机质含量  $W_A$  为页岩含油率的上限参数, 实际含油率则介于两者之间, 并以此来综合评价松辽

盆地北部青山口组烃源岩的含油性情况。

2012 年卢双舫等<sup>[22]</sup>对中国东部部分盆地主力烃源岩含油量进行统计分析, 得出了含油量“三分性”的分界值, 并由此将页岩油分为分散(无效)资源、低效资源和富集资源三级, 松辽盆地齐家-古龙凹陷地区青山口组的界线为: 有机碳含量 TOC 分别为 0.8%和 2.5%; 自由烃  $S_1$  含量分别为 0.8 mg/g 和 3.8 mg/g; 氯仿沥青“ $A$ ”含量分别为 2 mg/g 和 7 mg/g, 由此可知研究区页岩油属富集资源。2014 年柳波等<sup>[21]</sup>根据生烃动力学原理和本区残留烃量随成熟演化的趋势得到松辽盆地北部页岩油富集有利区的残留烃量下限分别为氯仿沥青“ $A$ ”含量为 3.5 mg/g、 $S_1$  为 0.79 mg/g, 若以此为标准, 研究区青山口组底部为页岩油的可利富集区。

### 2.2 可溶有机质族组成特征

青山口组烃源岩可溶有机质各族组分百分含量见表 3。由表 3 可知青山口组底部泥页岩各族组分中沥青质占优势, 其百分含量为 47.7%~89.0%, 平均为 61.2%, 并随着深度的增加其含量不断增大。饱和烃含量变化很大, 其相对百分含量在 2.3%~36.1%

表 2 青山口组烃源岩有机碳含量及岩石热解参数

Table 2 Organic carbon content and rock pyrolysis parameters of source rocks in Qingshankou Formation

编号	深度 $d$ (m)	地层	TOC (%)	岩石热解参数						生烃转化 率 $C$ (%)	排烃效 率 (%)
				$S_1$ (mg/g)	$S_2$ (mg/g)	$I_H$ (mg/g)	$(S_1/TOC) \times 100$ (mg/g)	PGI (mg/g)	$t_{max}$ (°C)		
SK1	1663.0	K <sub>2</sub> qn <sub>2+3</sub>	3.32	1.62	15.61	471	48.8	519	445	41.1	38.9
SK2	1675.9	K <sub>2</sub> qn <sub>2+3</sub>	4.31	1.38	25.60	594	32.0	626	447	25.8	26.4
SK3	1688.9	K <sub>2</sub> qn <sub>2+3</sub>	3.07	0.93	15.43	503	30.3	533	445	37.1	37.3
SK4	1702.3	K <sub>2</sub> qn <sub>1</sub>	2.76	1.13	13.78	499	40.9	540	446	37.6	36.5
SK5	1710.3	K <sub>2</sub> qn <sub>1</sub>	2.32	1.23	10.53	455	53.1	507	445	43.1	40.2
SK6	1718.4	K <sub>2</sub> qn <sub>1</sub>	1.39	0.86	4.67	336	61.9	398	442	58.0	53.2
SK7	1723.8	K <sub>2</sub> qn <sub>1</sub>	3.87	2.26	16.75	433	58.4	491	444	45.9	42.2
SK8	1735.6	K <sub>2</sub> qn <sub>1</sub>	3.26	1.34	11.59	355	41.1	397	445	55.6	53.4
SK9	1753.7	K <sub>2</sub> qn <sub>1</sub>	3.14	2.90	13.25	422	92.3	514	439	47.3	39.5
SK10	1765.3	K <sub>2</sub> qn <sub>1</sub>	2.49	2.13	10.19	409	85.6	495	439	48.9	41.8
SK11	1779.3	K <sub>2</sub> qn <sub>1</sub>	3.86	1.69	15.63	405	43.8	449	451	49.4	47.2

注: 生烃转化率  $C = ((I_{H0} - I_H)/I_{H0}) \times 100\%$ ,  $I_{H0}$  设为 800 mg/g;  $PGI = ((S_1 + S_2)/TOC) \times 100$ , 排烃效率 =  $(PGI - PGI_0)/PGI_0 \times 100\%$ ,  $PGI_0$  设为 850 mg/g.

表 3 青山口组烃源岩可溶有机质含量及相关参数

Table 3 Soluble organic matter content and related parameters in source rocks of Qingshankou Formation

编号	样品抽提 质量(g)	总抽提物 质量(mg)	可溶有机质含 量 $W_A$ (mg/g)	沥青质 质量(mg)	饱和烃 质量(mg)	芳烃质量 (mg)	非烃质量 (mg)	各族组分百分含量				Ts/ (Ts + Tm)
								沥青质 (%)	饱和烃 (%)	芳烃 (%)	非烃 (%)	
SK1	22.51	210	9.3	149	61	30	17	58.1	23.6	11.7	6.7	0.70
SK2	16.75	184	11.0	100	76	15	19	47.7	36.1	7.2	9.1	0.60
SK3	26.44	267	10.1	113	69	25	19	49.9	30.5	11.2	8.3	0.63
SK4	22.48	171	7.6	150	73	24	23	55.7	27.1	8.9	8.4	0.74
SK5	23.41	193	8.2	161	81	31	31	53.0	26.6	10.1	10.3	0.76
SK6	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SK7	22.48	220	9.8	176	100	45	24	51.0	29.0	13.0	7.0	0.78
SK8	67.59	456	6.7	553	70	76	28	76.1	9.6	10.5	3.8	0.80
SK9	40.22	579	14.4	486	151	24	17	71.7	22.2	3.5	2.5	0.87
SK10	60.71	686	11.3	584	15	4	53	89.0	2.3	0.7	8.1	0.83
SK11	67.91	451	9.3	380	109	129	15	60.0	17.2	20.4	2.3	0.89

注: 可溶有机质含量  $W_A = \text{总抽提物质量(mg)}/\text{样品质量(g)}$

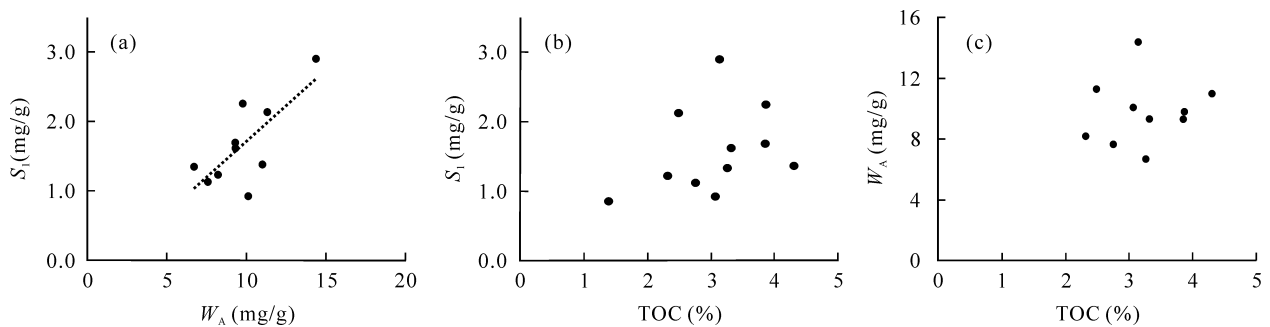


图 2 青山口组烃源岩含油率及其与 TOC 的关系

Fig.2 Oil contents of Qingshankou Formation source rocks and their correlations with TOC

(a) 含油率参数  $S_1$  与  $W_A$  的关系; (b)  $S_1$  与 TOC 的关系; (c)  $W_A$  与 TOC 的关系。

(a) Correlation between  $S_1$  and  $W_A$ ; (b) correlation between  $S_1$  and TOC content; (c) correlation between  $W_A$  and TOC content.

之间, 平均为 22.4%, 并随深度增加而降低, 两个异常低值出现在剖面底部样品 SK8 和样品 SK10 处, 其影响因素不明确。芳烃百分含量为 0.7%~13%, 平均为 9.7%, 随深度变化不明显。非烃百分含量为 2.3%~10.3%, 平均值为 6.7%。可溶有机质族组成特征对页岩油资源评价有重要意义, 其含量变化在某种程度上能反映页岩油的形成与演化过程, 一般有: 随着成熟度的增大, 沥青质含量降低, 而饱和烃含量增加<sup>[29]</sup>; 排烃作用使饱和烃等低分子量非极性组分优先排出, 而沥青质等高分子极性组分则残留下来<sup>[30]</sup>。因此, 烃源岩的可溶有机质族组成特征应从生烃、排烃两个方面予以讨论。另外, 应注意的是高沥青质含量不利于页岩油的开发。

### 3 含油率的相关性分析

影响页岩含油率的因素很多, 分析各种因素对含油率参数的影响, 能够为无法直接获取含油率参数的地方提供一种间接的评价方法。选取样品热解参数氢指数  $I_H$  在 355~594 mg/g 之间, 表明有机质类型较好, 并且随深度增加其值不断降低, 这可能是受热成熟作用所致。由于青山口组烃源岩有机质类型基本一致(I 型有机质)<sup>[18-20]</sup>, 故主要分析有机碳含量 TOC、热成熟作用以及排烃作用对含油率参数的影响。

#### 3.1 有机碳含量 TOC 与含油率参数的相关性

青山口组烃源岩的 TOC 含量变化不大, 分布在 1.39%~4.31% 之间, 平均值 3.07%, 且随深度增大而无明显变化(见表 2)。从图 2b 中可知在有机质类型基本一致的前提下, 青山口组烃源岩有机碳含量

TOC 与含油率下限参数  $S_1$  之间有较弱的正相关关系。整体上看, 随着有机碳含量的增加,  $S_1$  明显增高。但在含油率较高的区间内, 两者之间的正相关关系相对较差, 这可能主要受热成熟作用和排烃作用的干扰所致。青山口组烃源岩有机碳含量 TOC 与含油率上限参数  $W_A$  之间则无明显的相关关系(图 2c), 这表明在较高的有机质丰度的情况下(有机碳含量 TOC 大于 2%), 有机质丰度并不是影响泥页岩含油率的主要因素。

#### 3.2 成熟度指标与含油率参数的相关性

青山口组烃源岩样品  $t_{max}$  值在 439~451 °C 之间(表 2), 表明该套泥页岩沉积有机质热演化整体处于成熟阶段, 但  $t_{max}$  呈现出随深度增加反而减小的趋势, 这可能与受到残留烃的抑制作用有关, 因此不能准确地反映该层段页岩有机质的成熟度变化<sup>[31]</sup>。尹琴等<sup>[18]</sup>通过芳烃参数计算得到  $R_c$  值在 0.7% 左右, 也显示整体处于中等成熟水平。根据饱和烃气相色谱-质谱分析, 计算得到  $T_m$  及  $T_s$  的相对比值参数  $Ts/(T_m + T_s)$  (表 3), 其值在 0.70~0.89 之间, 该比值呈现出很好的随深度增加而线性增大的趋势(如图 3a 所示), 因此可用来代表成熟度的相对大小。为扣除有机质丰度的作用, 本文采用单位有机碳自由烃含量  $S_1/TOC$  和单位有机碳可溶有机质含量  $W_A/TOC$  随成熟度的变化来反映成熟作用对含油率的影响。从图 3b 中可看出单位有机碳自由烃含量  $S_1/TOC$  与成熟度指标  $Ts/(T_s + T_m)$  呈现较好的正相关关系, 随成熟度增加单位有机碳自由烃含量  $S_1/TOC$  也明显增大, 但在成熟度较高区域, 其正相关性变差, 这可能是受到排烃作用的干扰。单位有机碳可溶有机质含量  $W_A/TOC$  随成熟度的增加无明显变化(图 3c),

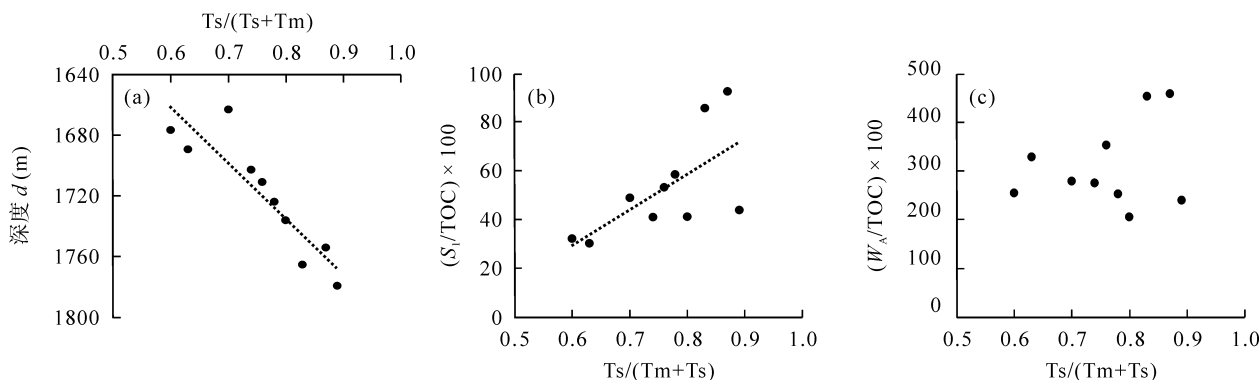


图3  $Ts/(T_m+T_s)$ 随深度变化及其与单位有机碳含油率的关系

Fig.3  $Ts/(T_m + T_s)$  ratio vs. burial depth and the oil content per unit TOC

(a) 成熟度参数  $Ts/(T_s+T_m)$  随深度的变化; (b) 单位自由烃含量随成熟度的变化; (c) 单位可溶有机质含量随成熟度的变化。  
(a)  $Ts/(T_s+T_m)$  vs. burial depth; (b)  $Ts/(T_s+T_m)$  vs. free hydrocarbon content of  $S_1$ ; (c)  $Ts/(T_s+T_m)$  vs. soluble organic matter content ( $W_A$ ).

在较高成熟度情况下,  $W_A/TOC$  表现出明显的波动性, 这可能主要受排烃作用的干扰。总体上看, 青山口组烃源岩含油率受到成熟度大小的影响, 成熟作用明显促进了沉积有机质的生烃转化, 但未达到热裂解生气的过成熟阶段, 还是以生油为主, 与陈方文等<sup>[32]</sup>的研究一致。

### 3.3 生烃、排烃作用对含油率的影响

生烃、排烃效率对页岩残留烃含量起着决定性作用, 其计算方法主要有实测法和生烃动力学法, 笔者采用实测法进行生、排烃效率计算。常用的生烃转化率计算公式如下:

$$C = (I_{H0} - I_H) / I_{H0}$$

式中:  $C$  为生烃转化率;  $I_{H0}$  为初始氢指数, 取值为 800 mg/g (I 型有机质);  $I_H$  为当前氢指数<sup>[33]</sup>。同理, 由生烃潜力指数  $PGI$  ( $PGI = ((S_1 + S_2)/TOC) \times 100\%$ ), 并根据该地区大量样品数据推理得未熟样品的原始  $PGI_0$  约为 850 mg/g, 计算可得排烃效率。由以上公式可计算得到不同深度源岩的生烃、排烃效率(表 2), 从表 2 中可看出青山口组烃源岩的生烃、排烃效率分别介于 35%~60%和 30%~55%之间, 平均值分别为 45%和 42%, 与刘洋等研究得到的松辽盆地北部青一段的生烃、排烃效率相当<sup>[33]</sup>。随着深度的增加, 生烃、排烃效率也相应增加, 但生烃转化率始终稍高于排烃效率, 这就使得残留效率也相应的增大。图 4 显示出生烃、排烃效率之间非常好的线性相关关系, 随着生烃转化率的增加, 排烃效率也相应的增大, 可能是由于随着生烃转化率的提高促进了烃类的初次运移排出<sup>[30]</sup>。排烃效率与含油率参数之间的关系如图 5 所示, 随着排烃效率的增加, 含油率下限参数  $S_1$  与上限参数  $W_A$  都呈明显的下降趋势,

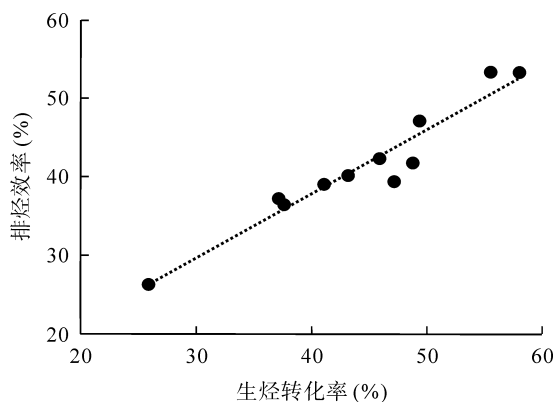


图 4 生烃转化率与排烃效率的关系

Fig. 4 Correlation between conversion rate of hydrocarbon generation and hydrocarbon expulsion efficiency

但上限参数  $W_A$  随之降低得更明显, 这可能是由于其含量较高, 受排烃作用影响更明显所致。总之, 排烃作用使泥页岩含油率明显降低。

青山口组烃源岩可溶有机质中沥青质含量非常高, 这可能是主要受排烃作用的影响。该区可溶有机质各族组分随成熟度的变化关系如图 5c 所示, 含量较高的沥青质和饱和烃族组成随排烃效率的增加表现出明显相反的变化趋势, 沥青质含量表现出随排烃效率的增加而增高的趋势, 饱和烃含量则随排烃效率的增加而逐渐降低。芳烃和非烃部分因含量较低而未表现出明显的变化趋势。这主要是由于排烃作用导致饱和烃等低分子量非极性组成优先排出, 而沥青质等高分子极性组分则残留下来<sup>[30]</sup>, 随着排烃作用的不断增强, 残留可溶有机质中沥青质不断富集, 而饱和烃则不断稀释。根据松辽盆地北部青山口组的埋藏史和热演化史, 结合生烃动力学实验, 2016 年刘洋等<sup>[33]</sup>确定了青山口组烃源岩的生油阶段主要为距今 80 Ma 至 40 Ma 之间, 同时也是该区的主力排烃阶段, 而排烃作用可能掩盖了生烃作用对可溶有机质族组成的影响。因此可溶有机质中高沥青质含量、低饱和烃含量的特征可能是由排烃作用所致, 同时不排除可能存在的实验误差和样品污染问题, 具体原因还需更多样品数据的支撑。

### 3.4 深度或层位对含油率的分布影响

综合以上分析, 松辽盆地北部青山口组烃源岩含油率参数受有机质丰度、成熟度和排烃作用等的共同影响。图 6 显示了含油率参数随深度的变化, 总体上看两参数随深度变化具有很好的相似性, 只是大小有一定差异, 这与前面叙述两参数具有某种内在联系相关。同时两参数之间也表现出微妙的差异性, 这可能是由于两者受有机质丰度、成熟度和排烃作用等的影响有所差异所致。从图 6a 中可知含油率下限参数  $S_1$  呈现出随深度增加而不断增大的总趋势, 这主要是热成熟作用的贡献, 排烃作用只是从整体上降低自由烃含量  $S_1$  的绝对值, 同时, 自由烃含量  $S_1$  又表现出一定的波动性, 特别是在底部地层, 波动较大, 这可能是受有机碳含量  $TOC$  的影响。含油率上限参数  $W_A$  含量随深度增加无明显增加趋势, 基本保持在平均值范围内上下波动(图 6b), 这可能是由于含量较大从而受到排烃作用的影响较大所致。若单从数量上考虑并以热解参数  $S_1$  (0.79 mg/g) 作为页岩含油率的下限参数值, 来评价该区页岩油

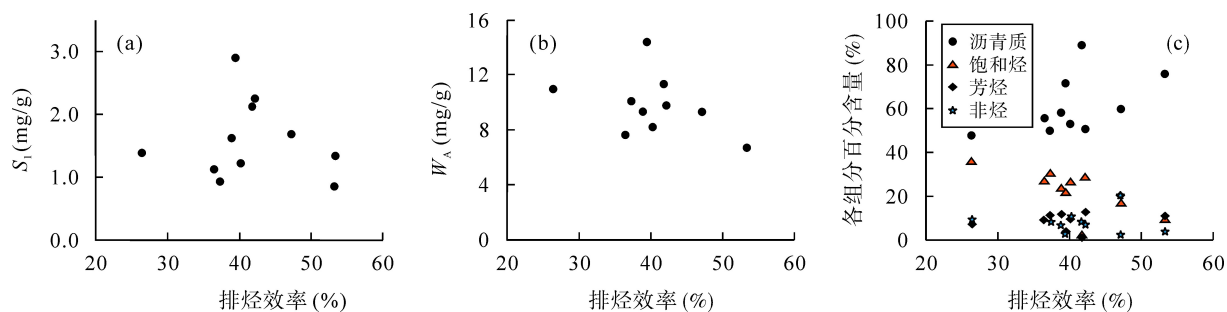


图5 排烃效率与含油率参数  $S_1$  和  $W_A$  的关系及对可溶有机质各族组成的影响

Fig.5 Correlation between hydrocarbon expulsion efficiency and oil content index of  $S_1$ ,  $W_A$ , and hydrocarbon fractions of total soluble extracts

(a) 排烃效率与含油率参数  $S_1$  的关系; (b) 排烃效率与含油率参数  $W_A$  的关系; (c) 排烃效率对各族组成的影响。  
(a) The correlation between hydrocarbon expulsion efficiency and  $S_1$ ; (b) the correlation between hydrocarbon expulsion efficiency and  $W_A$ ; (c) the correlation between hydrocarbon expulsion efficiency and hydrocarbon fractions of total extracts.

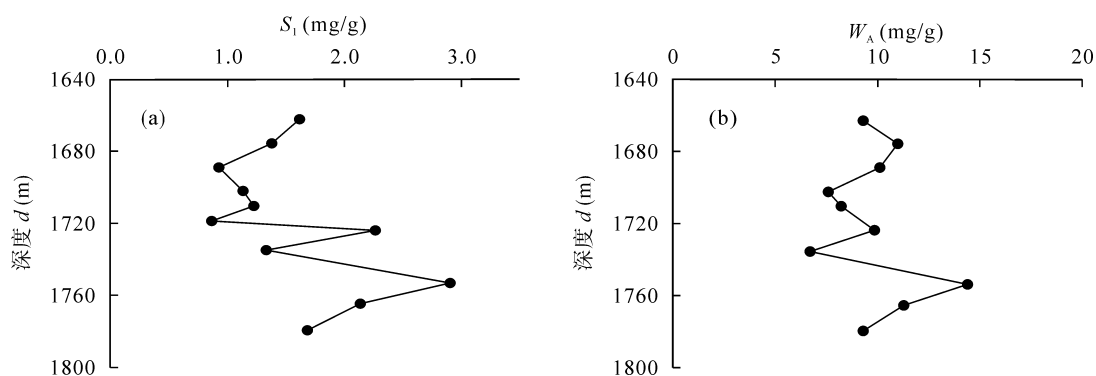


图6 青山口组烃源岩含油率随深度的变化

Fig.6 Variation of oil content index in Qingshankou Formation source rocks with burial depth

资源潜力, 松辽盆地晚白垩世青二三段底部及青一段层段都具备一定的页岩油资源潜力。应该注意的是, 青山口组烃源岩含油率虽然较高, 但是高沥青质含量不利于页岩油的开采。

## 4 结 论

(1) 青山口组烃源岩自由烃含量  $S_1$  在 0.86~2.9 mg/g 之间, 可溶有机质含量  $W_A$  在 6.6~14 mg/g 之间, 平均值分别为 1.6 mg/g 和 9.5 mg/g。自由烃含量  $S_1$  与可溶有机质含量  $W_A$  之间呈现较好的正相关关系, 这表明两个参数之间有一定的内在联系。

(2) 青山口组烃源岩可溶有机质族组分以沥青质丰度占优势, 其百分含量在 47.7%~89.0% 之间, 平均为 61.2%, 并随着深度的增加其丰度不断增大; 饱和烃含量变化很大, 其相对百分含量在 2.3%~36.1% 之间, 平均为 22.4%, 并随深度增加而降低; 芳烃和非烃百分含量很低。

(3) 含油率参数受有机质丰度、成熟度和排烃作用等因素的影响。随有机质碳含量 TOC 和成熟度

的增加, 含油率呈现一定的增加趋势, 排烃作用使含油率明显下降, 但不改变含油率随深度不断增加的总趋势。此外, 排烃作用导致沥青质丰度明显增加, 饱和烃丰度则明显降低。

(4) 综合评价结果表明: 若以热解参数  $S_1$  (0.79 mg/g) 作为页岩含油率的下限参数值来评价该区页岩油资源潜力, 松辽盆地晚白垩世青二三段底部及青一段都具备一定的页岩油资源潜力。

## 参考文献(References):

- [1] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.  
Jia Cheng-zao, Zheng Min, Zhang Yong-feng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. Pet Explor Develop, 2012, 39(2): 129-136 (in Chinese with English abstract).
- [2] 邹才能, 董大忠, 王社教, 李建忠, 李新景, 王玉满, 李登华, 程克明. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.  
Zou Cai-neng, Dong Da-zhong, Wang She-jiao, Li Jian-zhong, Li Xin-jing, Wang Yu-man, Li Deng-hua, Cheng Ke-ming. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. Pet Explor Develop, 2010,

- 37(6): 641–653 (in Chinese with English abstract).
- [3] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 朱如凯, 侯连华, 陶士振, 袁选俊, 吴松涛, 林森虎, 王岚, 白斌, 姚泾利. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14–26. Zou Cai-neng, Yang Zhi, Cui Jing-wei, Zhu Ru-kai, Hou Lian-hua, Tao Shi-zhen, Yuan Xuan-jun, Wu Song-tao, Lin Sen-hu, Wang Lan, Bai Bin, Yao Jing-li. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China [J]. *Pet Explor Develop*, 2013, 40(1): 14–26 (in Chinese with English abstract).
- [4] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91: 475–499.
- [5] Ross D J K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92: 87–125.
- [6] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91: 523–533.
- [7] Ross D J K, Bustin R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. *Mar Pet Geol*, 2009, 26: 916–927.
- [8] Hill R J, Jarvie D M, Zumberge J, Henry M, Pollastro R M. Oil and gas geochemistry and petroleum systems of the Fort Worth Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 445–473.
- [9] EIA. Technically recoverable shale gas and shale oil resources: An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States [J]. *Indep Statist Anal*, 2013 (6): 9–10.
- [10] 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 沈妍斐, 蒋婵, 何溥. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7–12. Jiang Yu-qiang, Dong Da-zhong, Qi Lin, Shen Yan-fei, Jiang Chan, He Fu-wei. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs [J]. *Nat Gas Ind*, 2010, 30(10): 7–12 (in Chinese with English abstract).
- [11] 曹涛涛, 宋之光, 王思波, 夏嘉. 不同页岩及干酪根比表面积和孔隙结构的比较研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(2): 139–151. Cao Taotao, Song Zhiguang, Wang Sibao, Xia Jia. A comparative study of the specific surface area and pore structure of different shales and their kerogens [J]. *Sci China: Earth Sci*, 2015, 45(2): 139–151 (in Chinese).
- [12] 王思波, 宋之光, 曹涛涛, 夏嘉. 中国南方古生界页岩吸附特征及控制因素[J]. 地球化学, 2014, 43(5): 429–436. Wang Si-bo, Song Zhi-guang, Cao Tao-tao, Xia Jia. Characterizing the methane sorption and its controlling factors in Paleozoic shales of south China [J]. *Geochimica*, 2014, 43(5): 429–436 (in Chinese with English abstract).
- [13] 谢军, 张浩淼, 余朝毅, 李其荣, 范宇, 杨扬. 地质工程一体化在长宁国家级页岩气示范区中的实践[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 21–28. Xie Jun, Zhang Hao-miao, She Chao-yi, Li Qi-rong, Fan Yu, Yang Yang. Practice of geology-engineering integration in Changning State Shale Gas Demonstration Area [J]. *China Pet Explor*, 2017, 22(1): 21–28 (in Chinese with English abstract).
- [14] 吕明久, 付代国, 何斌, 曾兴. 泌阳凹陷深凹区页岩油勘探实践[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(3): 85–88. Lü Ming-jiu, Fu Dai-guo, He Bin, Zeng Xing. The exploration practice of shale oil in deep depression of Biyang Depression [J]. *Pet Geol Eng*, 2012, 26(3): 85–88 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 唐玄, 朱亮亮, 邢雅文, 姜生玲, 荆铁亚, 杨升宇. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322–331. Zhang Jin-chuan, Lin La-mei, Li Yu-xi, Tang Xuan, Zhu Li-ang-liang, Xing Ya-wen, Jiang Sheng-ling, Jing Tie-ya, Yang Sheng-yu. Classification and evaluation of shale oil [J]. *Earth Sci Front*, 2012, 19(5): 322–331 (in Chinese with English abstract).
- [16] 高有峰, 王璞珺, 程日辉, 王国栋, 万晓樵, 吴河勇, 王树学, 梁万林. 松科 1 井南孔白垩系青山口组一段沉积序列精细描述: 岩石地层、沉积相与旋回地层[J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 314–323. Gao You-feng, Wang Pu-jun, Cheng Ri-hui, Wang Guo-dong, Wan Xiao-qiao, Wu He-yong, Wang Shu-xue, Liang Wan-lin. Description of Cretaceous sedimentary sequence of the first member of the Qingshankou Formation recovered by CCSD-SK-1 s borehole in Songliao Basin: Lithostratigraphy, sedimentary facies and cyclic stratigraphy [J]. *Earth Sci Front*, 2009, 16(2): 314–323 (in Chinese with English abstract).
- [17] 高有峰, 王璞珺, 王成善, 任延广, 王国栋, 刘万洙, 程日辉. 松科 1 井南孔选址、岩心剖面特征与特殊岩性层的分布[J]. 地质学报, 2008, 82(5): 669–675. Gao You-feng, Wang Pu-jun, Wang Cheng-shan, Ren Yan-guang, Wang Guo-dong, Liu Wan-zhu, Cheng Ri-hui. Well site selecting, core profile characteristics and distribution of the special lithology in CCSD-SK 1 [J]. *Acta Geol Sinica*, 2008, 82(5): 669–675 (in Chinese with English abstract).
- [18] 尹琴. 松辽盆地晚白垩系有机质碳氢同位素组成及其剖面变化的古环境意义[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2013. Yin Qin. The palaeo-environmental significance of the carbon and hydrogen isotopic composition and their profile variation of organic matter in the Late Cretaceous lacustrine source rocks of Songliao Basin, China [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of sciences, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [19] 钟艳飞, 郭江涛, 王丽, 宋之光. 松辽盆地松科 I 井青山口组沉积有机质特征及生烃潜力[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 487–497. Zhong Yan-fei, Guo Jiang-tao, Wang Li, Song Zhi-guang. Sedimentary organic matter characteristics and hydrocarbon potential of Qingshankou Formation of SK-1 from Songliao Basin [J]. *Geochimica*, 2009, 38(5): 487–497 (in Chinese with English abstract).
- [20] 冯子辉, 霍秋立, 王雪, 方伟, 宋之光. 松辽盆地松科 1 井晚白垩世沉积地层有机地球化学研究[J]. 地学前缘, 2009, 16(5): 181–191. Feng Zi-hui, Huo Qiu-li, Wang Xue, Fang Wei, Song Zhi-



- guang. Geochemical research on the Late Cretaceous strata of Well SK1 in Songliao Basin [J]. *Earth Sci Front*, 2009, 16(5): 181–191 (in Chinese with English abstract).
- [21] 柳波, 何佳, 吕延防, 冉清昌, 戴春雷, 李梅. 页岩油资源评价指标与方法——以松辽盆地北部青山口组页岩油为例[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(11): 3846–3852.  
Liu Bo, He Jia, Lü Yan-fang, Ran Qing-chang, Dai Chun-lei, Li Mei. Parameters and method for shale oil assessment: Taking Qinsankou Formation shale oil of Northern Songliao Basin [J]. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2014, 45(11): 3846–3852 (in Chinese with English abstract).
- [22] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 李吉君, 王民, 薛海涛, 王伟明, 蔡希源. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 249–256.  
Lu Shuang-fang, Huang Wen-biao, Chen Fang-wen, Li Ji-jun, Wang Min, Xue Hai-tao, Wang Wei-ming, Cai Xi-yuan. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application [J]. *Pet Explor Develop*, 2012, 39(2): 249–256 (in Chinese with English abstract).
- [23] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 李志明, 李政, 黄振凯, 张彩明, 马媛媛. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(6): 842–849.  
Jiang Qi-gui, Li Mao-wen, Qian Men-hui, Li Zhi-ming, Li Zheng, Huang Zhen-kai, Zhang Cai-ming, Ma Yuan-yuan. Quantitative characterization of shale oil in different occurrence states and its application [J]. *Pet Geol Exp*, 2016, 38(6): 842–849 (in Chinese with English abstract).
- [24] Zink K G, Scheeder G, Stueck H L, Biermann S, Blumenberg M. Total shale oil inventory from an extended Rock-Eval approach on non-extracted and extracted source rocks from Germany [J]. *Int J Coal Geol*, 2016, 163: 186–194.
- [25] Espitalié J, Madec M, Tissot B, Mennig J J, Leplat P. Source rock characterization method for petroleum exploration [J]. *MS OTC Confer Paper*, 1997 (2935): 439–444.
- [26] 薛海涛, 田善思, 王伟明, 张文华, 杜添添, 穆国栋. 页岩油资源评价关键参数——含油率的校正[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(1): 15–22.  
Xue Hai-tao, Tian Shan-si, Wang Wei-ming, Zhang Wen-hua, Du Tian-tian, Mu Guo-dong. Correction of oil content — One key parameter in shale oil resource assessment [J]. *Oil Gas Geol*, 2016, 37(1): 15–22 (in Chinese with English abstract).
- [27] Bordenave M L. Geochemical methods and tools in petroleum exploration [M]//*Applied Petroleum Geochemistry*. Paris: Editions Technip, 1993: 240–243.
- [28] 李国玉, 吕鸣岗. 中国含油气盆地图集(第二版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 1–492.  
Li Guo-yu, Lü Ming-gang. Atlas of China's Petroliferous Basins (Second Edition) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 1–492 (in Chinese).
- [29] Behar F, Roy S, Jarvie D. Artificial maturation of a Type I kerogen in closed system: Mass balance and kinetic modelling [J]. *Org Geochem*, 2010, 41: 1235–1247.
- [30] Ritter U. Solubility of petroleum compounds in kerogen: Implications for petroleum expulsion [J]. *Org Geochem*, 2003, 34: 319–326.
- [31] 曾花森, 霍秋立, 张晓畅, 鄢仁勤, 姜淑杰. 应用岩石热解数据  $S_2$ -TOC 相关图进行烃源岩评价[J]. *地球化学*, 2010, 39(6): 574–579.  
Zeng Hua-sen, Huo Qiu-li, Zhang Xiao-chang, Yan Ren-qin, Jiang Shu-jie. Source rock evaluation using the  $S_2$ -TOC plot from Rock-Eval pyrolysis [J]. *Geochimica*, 2010, 39(6): 574–579 (in Chinese with English abstract).
- [32] 陈方文, 卢双舫, 丁雪. 松辽盆地齐家-古龙凹陷中浅层烃源岩生烃量评价[J]. *沉积学报*, 2014, 32(6): 1181–1187.  
Chen Fang-wen, Lu Shuang-fang, Ding Xue. Evaluation on hydrocarbon-generation amount of middle-shallow source rocks of Qijia-Gulong Depression in Songliao Basin [J]. *Acta Sedimentol Sinica*, 2014, 32(6): 1181–1187 (in Chinese with English abstract).
- [33] 刘洋, 何坤, 李贤庆, 徐红卫, 张吉振, 扈松林, 王刚, 樊志伟. 湖相烃源岩生烃动力学及排油效率——以松辽盆地青山口组为例[J]. *现代地质*, 2016, 30(3): 627–634.  
Liu Yang, He Kun, Li Xian-qing, Xu Hong-wei, Zhang Ji-zhen, Hu Song-lin, Wang Gang, Fan Zhi-wei. Hydrocarbon generation kinetics and the efficiency of petroleum expulsion of lacustrine source rocks: Taking the Qingshankou Formation in the Songliao Basin as an example [J]. *Geoscience*, 2016, 30(3): 627–634 (in Chinese with English abstract).