

文章编号:0253-9985(2011)05-0682-10

塔里木盆地志留系沥青砂的二次生烃及地质意义

何 坤^{1,2,3}, 米敬奎^{1,2,3}, 张水昌^{1,2,3}, 王晓梅^{1,2,3}(1. 提高采收率国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石油 石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 中国石油 油气地球化学重点实验室, 北京 100083)

摘要:通过有机岩石学观察、地球化学分析及黄金管热模拟实验对塔里木盆地志留系沥青砂的二次生烃潜力进行了探讨。对代表井沥青砂岩样品的有机岩石学观察发现, 沥青砂中的有机质类型除了固体沥青外, 还存在一定量液态油。有机碳分析表明, 志留系沥青砂岩中有机碳含量比较高, 其分布范围为 0.56%~3.46%, 这些事实表明该地区志留系沥青砂很可能具有一定的生烃能力。进一步热模拟实验的结果证实, 该地区志留系沥青砂在足够的热应力作用下能生成一定量的烃类且产物以气态烃为主, 其中塔中 117 井与跃南 1 井原始沥青砂样品的最大生气量分别可达 46.80 mL/g 和 41.11 mL/g; 同时, 通过对比热解实验, 可以发现沥青砂中的液态油是产气的主要贡献者。最后, 基于哈得 11 井原油裂解的动力学参数进行地质推演表明, 在目前埋藏条件下, 塔里木盆地志留系沥青砂在其分布的部分区域可发生二次裂解生气, 且该裂解气可能成为该地区天然气的一个重要气源。

关键词:志留系沥青砂; 二次生烃; 原油裂解气; 黄金管热模拟; 塔里木盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Secondary hydrocarbon generation of the Silurian asphalt sandstone in the Tarim Basin and its geological implication

He Kun^{1,2,3}, Mi Jingkui^{1,2,3}, Zhang Shuichang^{1,2,3} and Wang Xiaomei^{1,2,3}(1. State key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing 100083, China;
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;
3. PetroChina Key Laboratory for Petroleum Geochemistry, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper investigated the secondary hydrocarbon generation potential of the Silurian asphalt sandstone in Tarim through organic petrologic observation, geochemical analysis and simulated experiment of gold-tube pyrolysis. Observation on the organic petrologic features of asphalt sandstone samples from selected wells indicates that liquid oils also exist as another main type of organic matters in addition to solid asphalt. Analysis of total organic carbon (TOC) reveals that the Silurian asphalt sandstone with relative high value of TOC, which ranges from 0.56% to 3.46%. These studies suggest that the Silurian asphalt sandstone in Tarim Basin may have some potential of secondary hydrocarbon generation. Gold-tube pyrolysis experiments further confirm that the Silurian asphalt sandstone in Tarim can generate certain amount of hydrocarbons, mostly gaseous hydrocarbons, under intense thermal stress. The maximum gas yields of samples from Tazhong-11 well and Yuenan-1 well reach 46.80 mL/g and 41.11 mL/g respectively. Furthermore, comparative pyrolysis experiments on the original and chloroform-extracted samples reveal that the gas are mostly generated from cracking of the liquid oil in asphalt sandstone. Finally, geologic deduction is performed by using the kinetic parameters of HD-11 oil cracking. The results show that gas generation from secondary cracking is possible for the Silurian asphalt sandstone in certain zones in Tarim Basin under current burial depth. And those cracking gas may be an important sources for the gas

收稿日期: 2010-09-17; 修订日期: 2011-04-20。

第一作者简介: 何坤(1982—), 博士, 油气地球化学及油气生成机理。

基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2008D-5006-01-02)。

reservoirs in the study area.

Key words: Silurian asphalt sandstone, secondary hydrocarbon generation, oil cracking gas, gold-tube pyrolysis, Tarim Basin

塔里木盆地志留系砂岩中存在大面积分布的沥青(沥青砂岩)^[1-2],沥青砂岩分布受油源区及古隆起控制,并且可以作为油气源^[3-4]。一直以来,大量文献对塔里木盆地志留系的沥青砂成因、地化特征及分布特征进行了比较深入的报道,并基本认为:加里东末期的构造运动使来源于寒武系一下奥陶统海相源岩的志留系原油遭受了强烈的降解破坏,从而形成了大面积分布的沥青砂^[5-8]。

然而考虑到降解残余物沥青质的生烃潜力较差,关于志留系沥青砂岩的二次生烃很少引起研究者的关注。实际上,有研究表明,未强烈氧化或降解的沥青在热演化过程中常能生成一定量的液态或气态烃类^[9-10]。同时,塔里木志留系沥青砂中的有机质除了固体沥青外,还很可能残留有一定量呈吸附态的液态烃或油,它们在后期的埋深过程中,是否会发生裂解生气?如果志留系沥青砂可以发生二次生烃,那么它的生烃潜力多大?

生烃机理是什么?它对后期的油气聚集有怎样的贡献?弄清这些问题,将有助于我们合理评价该地区油气资源以及指导油气勘探。

基于此,本文通过有机岩石学观察、地化分析以及黄金管热模拟实验,针对塔里木盆地志留系沥青砂的二次生烃潜力、生烃类型及生烃机制开展了相关研究。同时,结合模拟实验的地质推演结果和塔里木盆地实际的地质条件,对志留系沥青砂有利生气的区域进行了初步的预测。

1 地质背景

塔里木盆地志留系分布面积约 $2.49 \times 10^5 \text{ km}^2$, 钻遇志留系的探井为 122 口, 其中近 50 口井见沥青砂岩。统计数据显示, 盆地内沥青砂岩分布面积约 $2.53 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要分布在盆地中西部塔中低凸起、塔北隆起中西部及其斜坡区、巴楚凸起(图 1), 三大主要区块沥青砂岩面积分

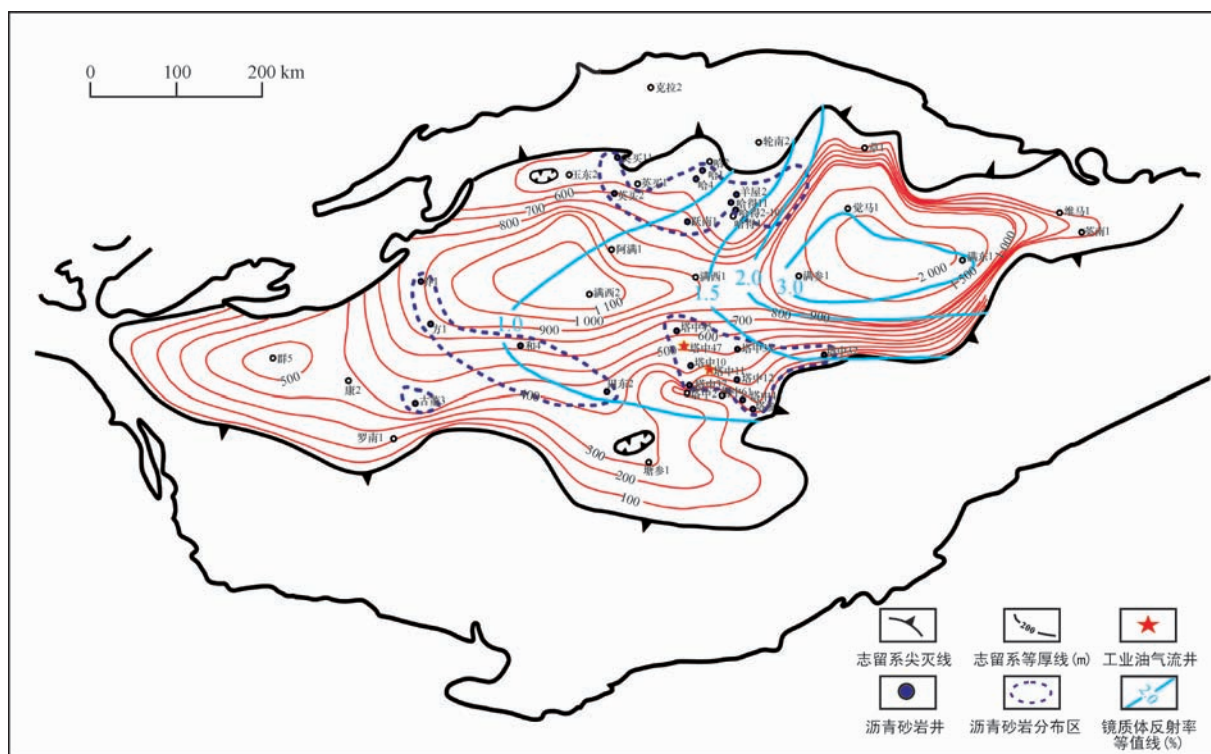


图1 塔里木盆地志留系和志留系沥青砂平面分布

Fig. 1 Plane distribution of the Silurian and its asphalt sandstone in Tarim Basin

别为 7 419, 7 580 和 10 322 km²。另外,柯坪断隆地表也出露有大量志留系沥青砂岩。在塔北隆起沥青砂岩厚度最大的是哈 1 井, 厚度 152.5 m。塔中地区在几米至几十米之间, 最薄的是塔中 401 井 2 m。而巴楚隆起沥青砂岩厚度较薄, 平均厚度为 6 m, 并见到地表油气显示。在乔 1 井和乔 2 井的岩心观察中可见再沉积作用形成的沥青砂屑。整个塔里木盆地沥青砂岩的平均厚度达 30.5 m。塔里木盆地志留系根据岩性特征从上至下可以分为 5 个岩性段: 上泥岩段、上砂岩段、红色泥岩段、下砂岩段和暗色泥岩段。沥青砂岩基本都分布在下砂岩段内, 不同地区稍有差别。

2 沥青砂的有机岩石学特征

志留系沥青砂中的有机质类型有 3 种: 降解形成的固体沥青(图 2); 吸附状态的液态油(图 3); 以包裹体状态存在的油气。前两者是沥青砂主要的有机质类型。研究表明沥青砂中的沥青按产状有 3 种赋存状态: 包裹在颗粒内部, 如岩石颗粒的微裂缝或石英加大边内缘(图 2a); 残留在孔隙边缘(图 2b); 位于粒间孔隙中间(图 2c)。根据薄片镜下观察, 可估算沥青砂岩中沥青的体积含量在 1%~6% 之间, 平均为 4%。而从荧光照片可

以发现, 呈棕黄色荧光的液态油主要以吸附态分布在黑色沥青的周围(图 3)。

同时, 本文选取了 6 个代表井, 对其志留系沥青砂中固体沥青的反射率进行了测定(表 1)。研究发现, 固体沥青的热演化均已进入成熟及过成熟阶段, 其反射率主要分布在两个范围: 1.0%~1.06% 和 0.56%~0.78%, 再加上与目前油藏有成因联系的软沥青, 可以确定, 塔里木盆地志留系沥青砂中至少有三期沥青。

3 沥青砂的地球化学特征

沥青砂中的有机质和一般烃源岩中的有机质在组成上存在许多差异, 有效烃源岩的有机碳下限可能并不适合作为沥青砂是否具有生烃能力的评价标准。但是有机碳含量(TOC)的高低, 势必会对沥青砂的生烃潜力有非常大的影响。

为了评价沥青砂的总有机碳含量及吸附油的相对含量, 本文选取了部分代表井样品, 进行了有机碳及氯仿沥青“A”的抽提分析(表 2)。分析发现, 志留系沥青砂中有机碳的含量都比较高, 平均值达到 1.85%, 这远大于一般烃源岩 0.5% 的标准^[11]。显然, 志留系沥青砂中较高的有机碳含量为沥青砂可能的二次生烃提供了物质基础。

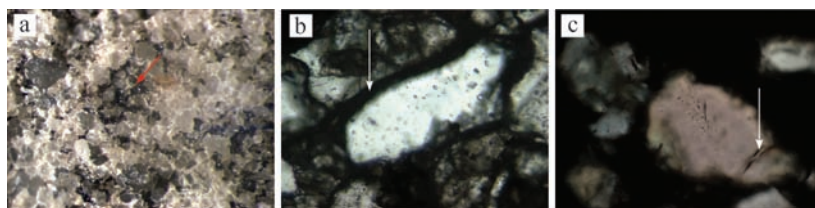


图 2 塔里木盆地志留系沥青砂中沥青的分布

Fig. 2 Distribution of asphalt in the Silurian asphalt sandstone of Tarim Basin

a. 石英微裂缝中(透光片, 塔中 161 井, 4 223.8 m); b. 石英颗粒周围(透光片, 塔中 67 井, 4 090 m); c. 颗粒孔隙中(岩心照片, 哈 1 井, 6 230 m)

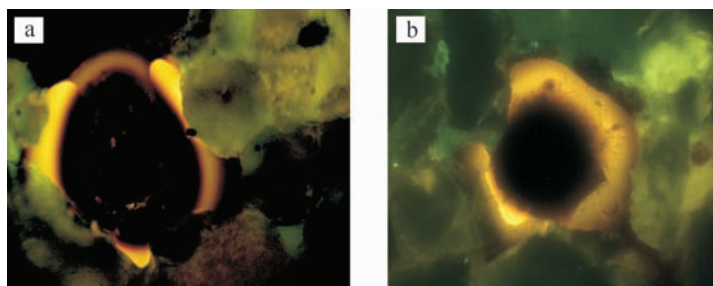


图 3 塔里木盆地志留系沥青砂中沥青周围的液态油

Fig. 3 Liquid oils surrounding asphalt in the Silurian asphalt sandstone in Tarim Basin

a. 塔中 117 井, 4 430.8 m, 荧光薄片; b. 哈得 17 井, 5 591 m, 荧光薄片

表 1 塔里木盆地代表井中沥青镜质体反射率及等效镜质体反射率

Table 1 Asphalt reflectance and its equivalent vitrinite reflectance of samples from representative wells in Tarim Basin

井号	深度/m	岩性	R_b , %		等效镜质体反射率 R_o , %
			分布范围	平均值	
塔中 16	3 824. 80	砂岩	0. 56 ~ 0. 70	0. 63	0. 73
塔中 47	4 980. 00	砂岩	0. 62 ~ 0. 72	0. 68	0. 77
塔中 117	4 453. 22	砂岩	0. 95 ~ 1. 10	1. 05	1. 00
			0. 70 ~ 0. 76	0. 72	0. 79
跃南 1	6 326. 35	砂岩	1. 10 ~ 1. 23	1. 16	1. 06
			0. 74 ~ 0. 80	0. 76	0. 81
哈 1	6 230. 00	砂岩	0. 69 ~ 0. 78	0. 74	0. 80
羊屋 2	5 237. 00	砂岩	0. 65 ~ 0. 75	0. 70	0. 78

注:表中等效镜质体反射率按照 $R_o=0.668R_b+0.346$ (刘德汉,1990) 计算, R_b 为实测沥青镜质体反射率。

表 2 塔里木盆地代表井沥青砂地球化学特征

Table 2 Geochemical behaviors of the Silurian asphalt sandstone from representative wells in Tarim Basin

井号	井段	含量			资料来源
		有机碳, %	氯仿沥青 A, %	(氯仿沥青“A”/有机碳)/(mg · g ⁻¹)	
跃南 1	5 864. 2	1. 23	1. 150	93. 5	本次实测
跃南 1 *	5 860. 4	1. 07	0. 816	76. 3	
跃南 1	5 857. 3	1. 11	0. 986	88. 8	
	6 197. 0	2. 05	1. 245	60. 7	
跃南 2	6 199. 3	1. 87	1. 345	65. 6	
	6 307. 5	3. 46	2. 648	71. 3	
羊屋 2	5 218. 0	2. 45	2. 020	82. 4	
羊屋 2	5 290. 0	0. 63	0. 482	76. 5	
哈得 17	5 343. 7	1. 82	1. 456	80. 0	
塔中 117 *	4 453. 2	2. 03	1. 456	71. 7	
塔中 11	4 314. 2	2. 57	1. 560	60. 7	刘洛夫 ^[7]
	4 444. 9	0. 56	0. 372	66. 4	
塔中 12	4 149. 8	1. 862	1. 446	77. 7	
	4 384. 6	2. 312	2. 113	91. 4	
	4 414. 8	2. 766	2. 641	95. 1	
	4 418. 7	2. 844	1. 475	51. 9	
塔中 30	4 263. 0	0. 871	0. 402	46. 2	
	4 256. 0	1. 25	0. 901	72. 1	
塔中 401	3 863. 0 ~ 3 880. 0	2. 54	3. 74	147. 2	
	3 880. 0 ~ 3 889. 0	1. 67	1. 98	118. 6	
哈 1	6 085. 0 ~ 6 101. 0	2. 02	1. 47	72. 8	

注: * 本文进行模拟实验的沥青砂样品。

同时,表 2 中数据显示,沥青砂岩中氯仿沥青“A”的平均含量为 1. 51 %。如果氯仿沥青“A”的组分大致均按—CH₂—的缩合分子结构来计算,那么,氯仿沥青“A”中纯有机碳的含量为 85. 7 %,氯仿沥青“A”中的有机碳占整个沥青砂样品有机碳量的近 70 %,这意味着沥青砂的生气潜力很可能主要取决于可溶有机质。

4 沥青砂岩的二次生烃

为了进一步探讨志留系沥青砂的生烃特征、生烃潜力及生烃机理,本文选取了跃南 1 井和塔中 117 井的两个沥青砂样品开展了一系列黄金管热模拟实验(表 3)。

表3 塔里木盆地志留系沥青砂热解实验样品基本特征

Table 3 Basic features of two pyrolysis experiment samples from the Silurian in Tarim Basin

井号	岩性	深度/m	有机碳含量, %	(氯仿沥青“A”/有机碳)/(mg·g ⁻¹)	饱和烃, %	芳烃, %	非烃+沥青质, %
塔中117	砂岩	4 453.22	2.10	268.00	15.21	23.46	61.33
跃南1	砂岩	5 864.20	1.23	230.38	16.04	26.66	57.3

4.1 实验及分析方法

本研究进行的模拟实验包括两组不同升温速率(2℃/h和20℃/h)的升温热解,采用的体系压力为50 MPa。气体产物的组分分析是在Agilent微量色谱分析仪上完成,该仪器由Agilent 6890气相色谱和Wasson ECE微量控制装置两部分组成,包括一个FID检测器及两个TCD检测器。气体分析所用的进样口温度为250℃,分流比为25:1,柱箱温度条件:初始为68℃,保持7 min,然后以10℃/min升温至90℃保持

1.5 min,再以15℃/min升温至175℃,最后保持5 min。原油的族组分按照“SY/T 5119-2008 岩石中可溶有机物及原油族组分分析”方法进行分离和定量。

4.2 液态烃产率及族组分演化特征

我们分别对两个志留系沥青砂样品在热演化过程中液态烃的产率变化进行了研究,其中200℃的点对应的液态油或烃产率代表原始沥青砂的氯仿沥青“A”抽提物中的相应组分的量(图4,图5)。

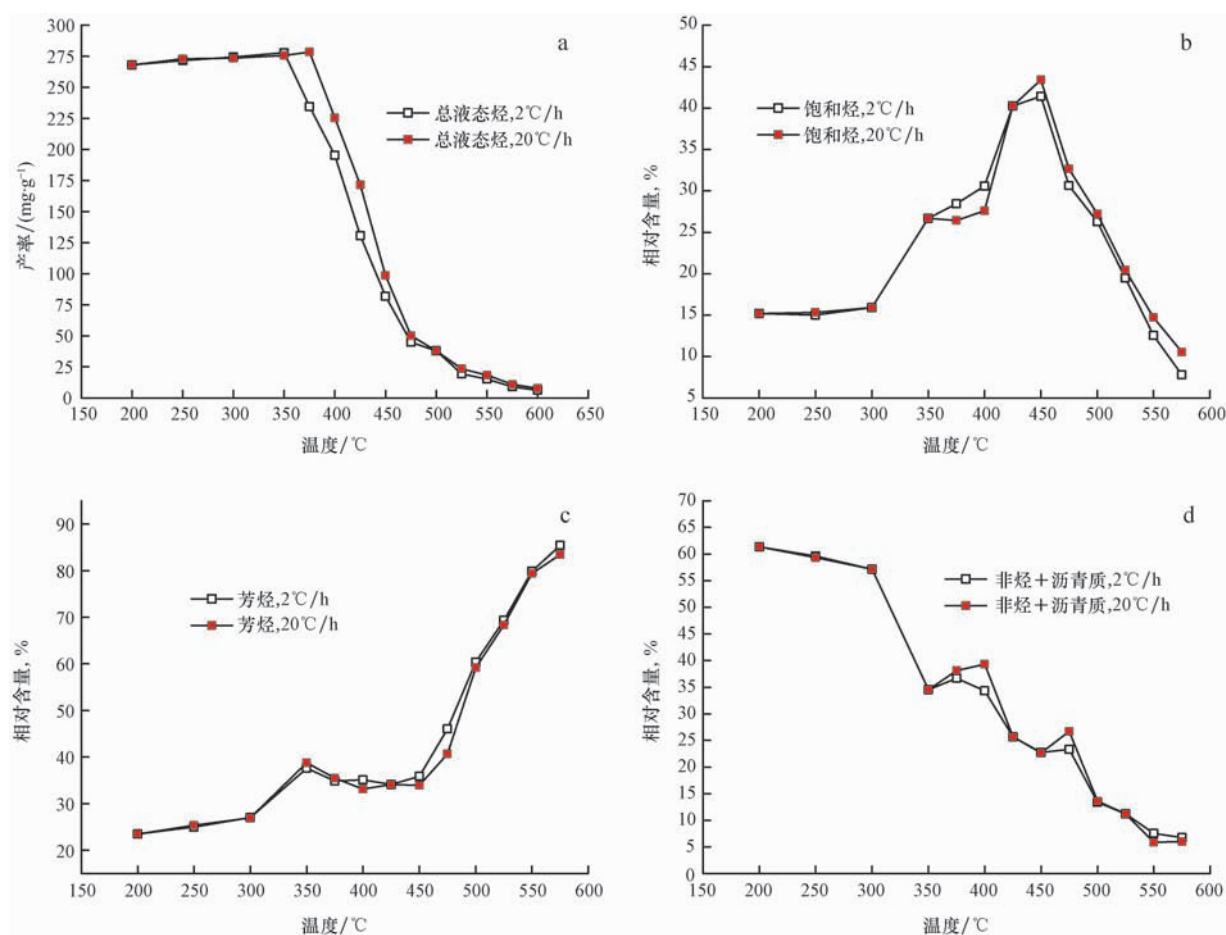


图4 塔中117井志留系沥青砂热解过程中液态组分的产率

Fig. 4 Yields of liquid hydrocarbons from pyrolysis of the Silurian asphalt sandstone in Tazhong 117 well

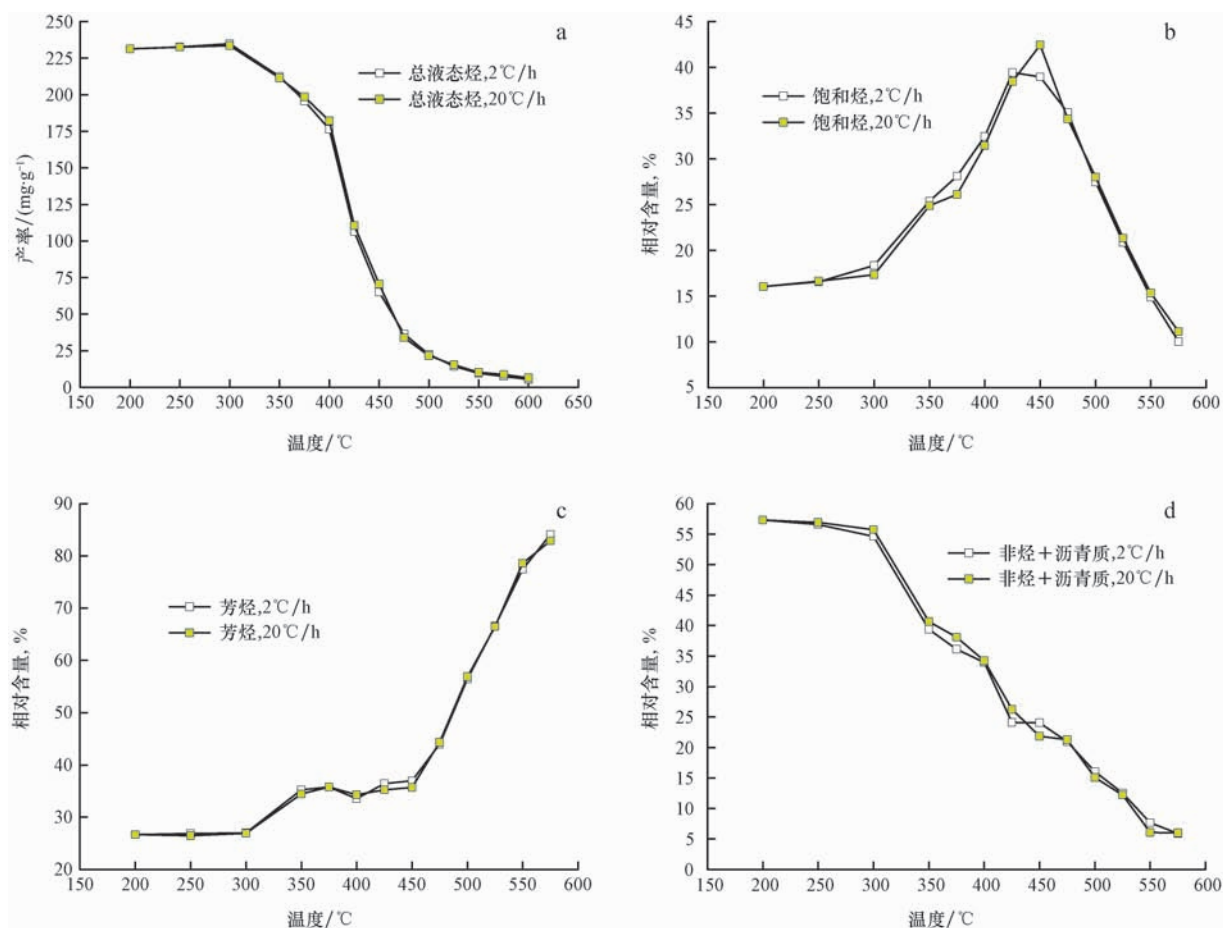


图5 跃南1井志留系沥青砂热解过程中液态组分的产率

Fig. 5 Yields of liquid hydrocarbons from pyrolysis of the Silurian asphalt sandstone in Yuenan 1 well

从总液态烃的产率变化来看,在热演化的生油阶段(热解温度低于400 °C的阶段),总液态油的产率随着温度的增高仅有少量的增加,塔中117井与跃南1井样品最高产率比原始抽提物只分别增加了2.16和2.18 mg/g。这表明沥青砂二次埋深生成液态油的潜力不大。当热解温度高于400 °C时,液态烃的产率迅速降低,这是由于沥青砂中原始及后期生成的液态有机质在持续增加的热应力作用下,发生了强烈的裂解生气。

两组热解实验过程中,沥青砂中液态烃各族组分的相对含量显示出相似的演化规律。随热解温度的升高,饱和烃相对含量出现先增加后降低的趋势,在400~450 °C达到最高点,芳香烃的相对含量不断升高,而非烃+沥青质的含量则持续降低。各族组分的热演化特征显然与它们的化学性质及相对热稳定性密切相关,在热演化初期阶

段,含不稳定杂原子化合物的非烃首先发生共价键的断裂,部分生成饱和烃与芳烃。沥青质组分在热解过程中与烃类发生歧化反应,在生成小分子烃的同时,会伴随有固体沥青的生成,从而引起非烃和沥青质相对含量的不断减少。而当热演化进入到高温条件阶段时,由于饱和烃的相对稳定性变得要低于芳烃^[12],其结构中的C—C键裂解加速,从而使得饱和烃相对含量降低,芳烃相对含量增加。

液态烃的产率分析结果表明,志留系沥青砂生油能力较弱,而液态组分的不断裂解似乎表明沥青砂在热演化过程中应以产气为主。

4.3 气体产物产率及组分演化特征

从上述可知,沥青砂中残留的及热解初期生成的液态烃在后期会发生裂解生气作用,为了进

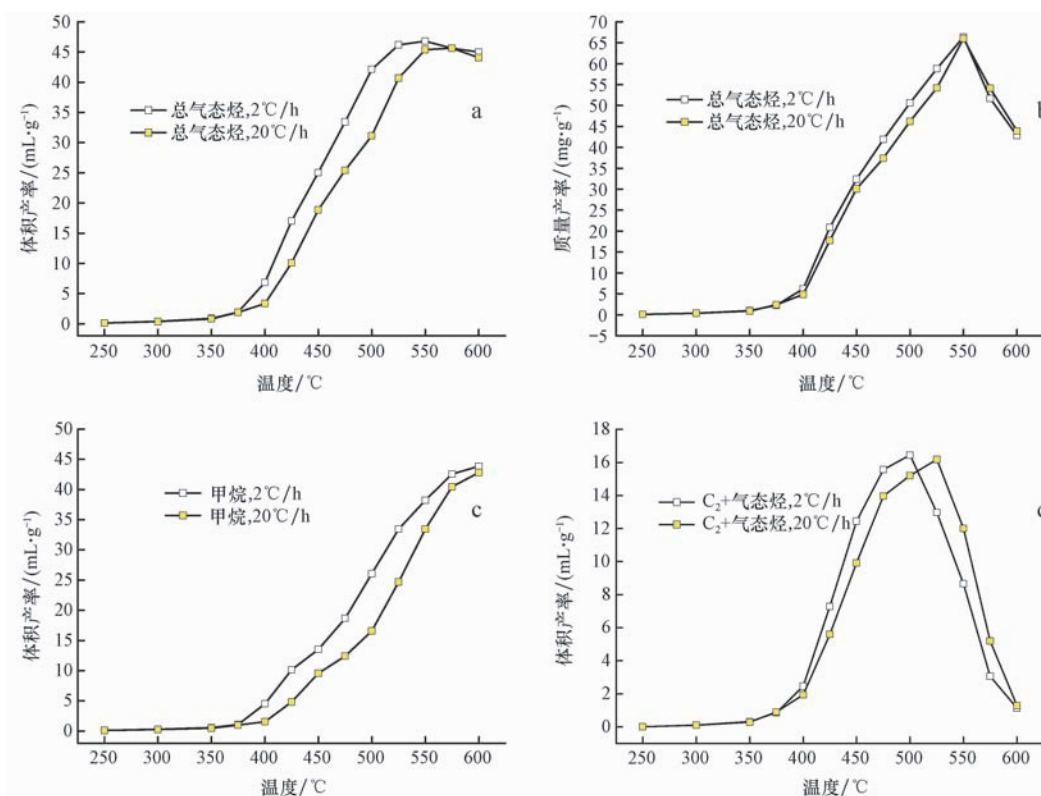


图6 塔中117井志留系沥青砂热解过程中生成各种气体的产率

Fig. 6 Yields of gaseous hydrocarbons from pyrolysis of the Silurian asphalt sandstone in Tazhong 117 well

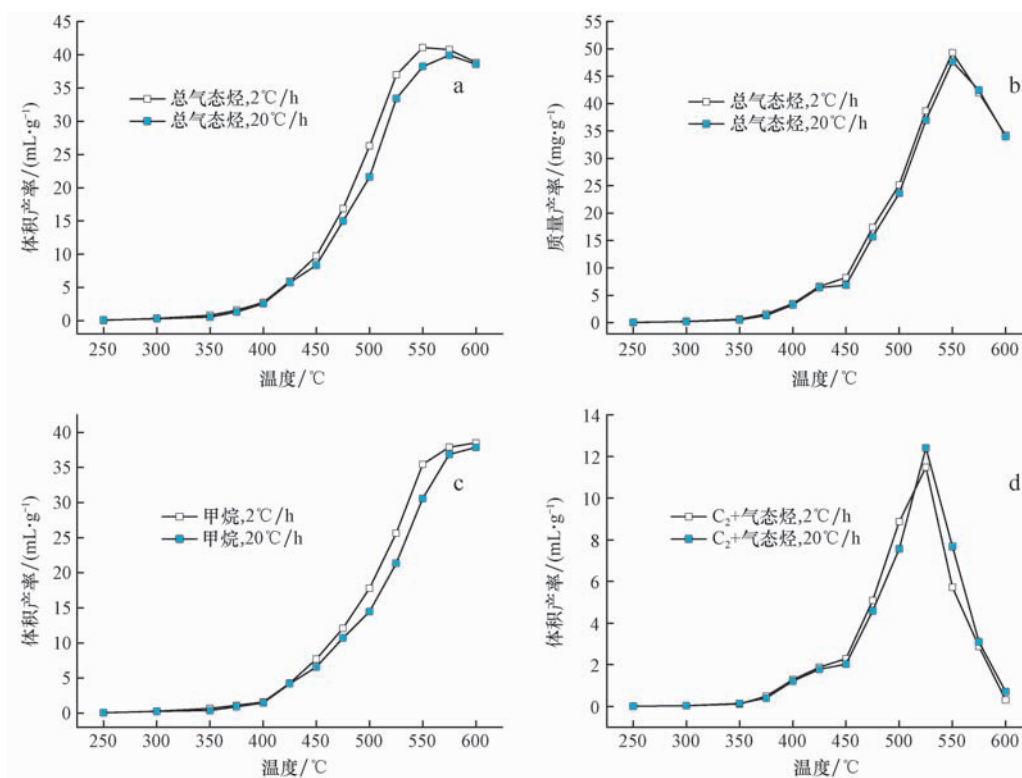


图7 跃南1井志留系沥青砂热解过程中生成各种气体的产率

Fig. 7 Yields of gaseous hydrocarbons from pyrolysis of the Silurian asphalt sandstone in Yuenan 1 well

一步认识其生成烃类气体的产率及特征,本文对样品在热模拟实验中得到的气体产物进行了定量分析。并分别给出了塔中117井与跃南1井志留系沥青砂在热模拟实验中得到的各种气体的产率(图6,图7)。

结果表明,沥青砂生成的气态烃产率随着热演化的进行不断增加,塔中117井与跃南1井两个沥青砂样品的最大生气量分别可达46.80和41.11 mL/g。烃类气体中,甲烷的产率随着模拟温度的升高而持续增加;重烃(C_{2+})气体的产率在热解早期先逐渐升高,当温度超过500℃之后,其产率不断降低。这主要是因为 C_{2+} 烃类气体在较强的热应力作用下,发生了进一步的裂解,并最终生成小分子烃或甲烷。

尽管沥青砂的热解产气能力只相当于低变质煤(镜质体反射率 $R_o = 0.5\%$)的1/4及一般原油的1/15左右,但考虑到它在塔里木盆地志留系中存在如此大面积的分布,其生成天然气的潜力也就不容忽视。

4.4 沥青砂生气机制

有机岩石学的观察表明,沥青砂岩中主要的有机质类型有两种,即吸附状态的液态油和残余的固体沥青。显然,液态油的裂解和固体沥青的热解都可能生成气态烃类。为了进一步研究沥青砂的热解生成的气态烃主要来源于哪种有机组分,本文选用了塔中117井志留系沥青砂分别进行了全岩和抽提样品的热解实验。沥青砂岩样品

的抽提选用三氯甲烷作为溶剂,抽提样品的产气能力等效于固体沥青。

通过对沥青砂与固体沥青在热解过程中生成的总气态烃和甲烷的产率。研究发现,固体沥青生烃潜力非常有限,其最大产气量不超过10 mL/g(图8)。与未抽提的沥青砂相比,固体沥青生烃有如下几个特点:生成的液态烃非常少;气体的最大产率只有未抽提的沥青砂岩的1/4~1/5;较沥青砂的生气门限更高,其中沥青砂岩开始大量生气的温度为400℃,而固体沥青开始大量生气的温度为475℃。实际上,固体沥青是强烈热蚀变或生物降解的产物,主要由稠和芳香类的有机结构组成,脂肪链,尤其是长脂肪链的含量较低,因此它在热演化过程中能释放出的烃类就很少。同时,由于较短支链的C—C键断裂所需能量相对较高,使得固体沥青的热解生气门限温度也较油裂解更高。

因此,沥青砂热解过程中生成的气态烃主要来自于吸附液态油的裂解,结构中脂肪链含量很低的固体沥青对沥青砂的生气潜力贡献不大。

5 地质意义

模拟实验的结果表明,塔里木盆地志留系沥青砂具有一定的生气潜力。那么在目前的埋藏条件下,这些大面积分布的沥青砂是否曾发生过热解生气过程?既然沥青砂生气的机制主要是其吸

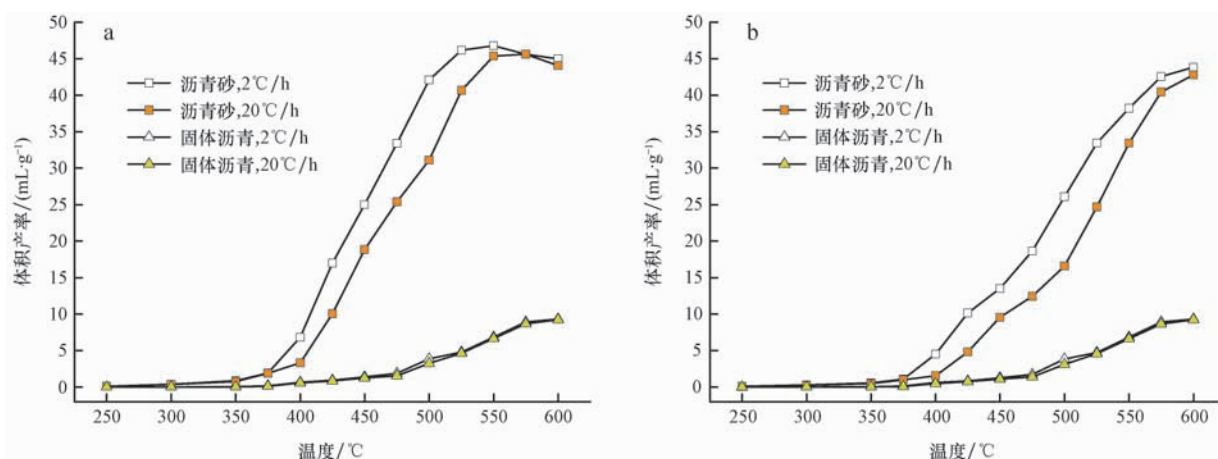


图8 塔中117井沥青砂岩与抽提后样品在热解过程中的产气率

Fig. 8 Gas yields from pyrolysis of original asphalt sandstone and chloroform-extracted samples in Tazhong 117 well

a. 总气态烃; b. 甲烷

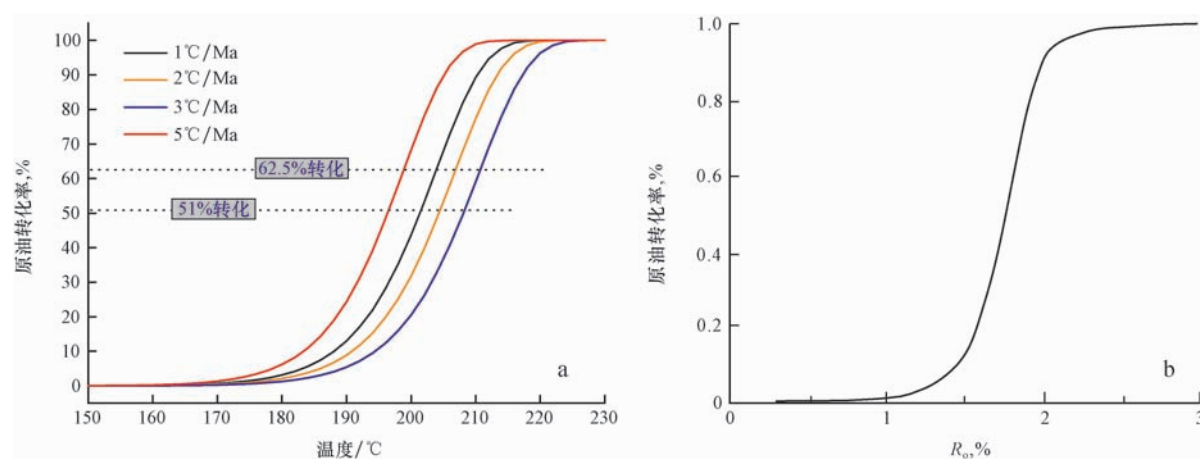


图9 地质条件下原油裂解生气的转化率与地层温度和 R_o 的对应曲线

Fig. 9 Transformation ratio of oil cracking under in-situ conditions vs. formation temperature and R_o .

附的液态油的裂解,那么要解决上述问题,就需要弄清目前埋藏条件下液态油能否裂解生气以及其气态烃转化率高。

关于原油或烃类的裂解生气,前人已经开展了大量的工作,通常认为原油开始发生裂解生气的温度大于 170 °C^[13]。我们曾选取塔里木盆地哈得 11 井石炭系原油进行了裂解生气研究^[14],根据计算得到的动力学参数,可推演到特定的地质条件下原油裂解模型(图 9)。结果表明,对于一般地质条件(2.0 °C/Ma)来说,当地层温度为 200 °C 或 R_o 等于 1.7% 时,原油开始大量裂解;当地层温度达到 210 °C 或 R_o 等于 2.0% 时,原油裂解成气的转化率可达到 90%。

根据盆地模拟软件计算得到的志留系沥青砂等效镜质体反射率的等值线分布可以看出(图 1),志留系沥青砂成熟度位于 1.0% ~ 1.5% 的区域包括塔中、哈得逊、和 4 - 玉东 2,由于 R_o 小于 1.5%,液态吸附油裂解生气的转化率较低,这 3 块区域沥青砂岩在目前地质条件下二次裂解成气量可以忽略不计。沥青砂成熟度介于 1.5% ~ 2.0% 之间的区域主要位于塔北地区,少量位于满南地区,如果这两个区域的平均成熟度为 1.75%,那么液态油的裂解生气转化率可以达到 60%。而对于位于塔北东部 R_o 大于 2.0% 的区域来说,沥青砂吸附液态油的基本完全裂解生气。因此,如果有合适的运聚条件,塔北,尤其是塔北东部轮南地区最有可能形成志留系沥青砂岩二次裂解气藏。目前塔北地区已发现的天然气除了来源于早

期寒武系原油裂解外^[15-17],也很可能存在志留系沥青砂岩二次裂解气的贡献。

6 结论

塔里木盆地志留系沥青砂中高的有机碳及可抽提的氯仿沥青“A”含量为沥青砂的二次生烃提供了可能。沥青砂中的有机质类型主要包括固体沥青和液态油,前者由于经历了强烈的热蚀变作用,结构中脂肪链的含量很低,在热解过程中通常只能生成微量的液态烃及气态烃;而沥青砂中的液态油部分在裂解过程中能生成一定量的烃类气体,它是沥青砂在后期热演化过程中热解生气的主要贡献体。尽管沥青砂的生气能力远低于同样质量的煤热解或原油裂解,但其在塔里木盆地志留系中如此大面积的分布使得沥青砂在热演化过程中的生气总量不容忽视。

相对于成熟度较低的塔中、哈得逊、和 4 - 玉东 2 等区域来说,成熟度普遍较高(R_o 大于 1.5%)的塔北部分区域(尤其是 R_o 大于 2.0% 的轮南地区)的志留系沥青砂在后期的埋深过程中很可能发生了强烈的裂解生气过程,且这些裂解气应该为这些区域的天然气聚集提供了部分气源。

参 考 文 献

- [1] 刘洛夫, 赵建章, 张水昌, 等. 塔里木盆地志留系沉积构造及沥青砂岩的特征[J]. 石油学报, 2001, 22(6): 11 - 17.

- Liu Luofu, Zhao Jianzhang, Zhang Shuichang, et al. The depositional and structural settings and the bituminous sandstone distribution characters of the Silurian in Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(6): 11–17.
- [2] 张俊, 庞雄奇, 刘洛夫, 等. 塔里木盆地志留系沥青砂岩的分布特征与石油地质意义[J]. *中国科学(D)辑*, 2004, 34(增刊 I): 169–176.
- Zhang Jun, Pang Xiongqi, Liu Luofu, et al. The distribution characteristics of the Silurian bituminous sandstone in Tarim Basin and its implication in petroleum geology [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(supp I): 169–176.
- [3] 张水昌, 梁狄刚, 张宝民, 等. 塔里木盆地海相油气生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- Zhang Shuichang, Liang Digang, Zhang Baomin, et al. The occurrence of marine petroleum in Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [4] Zhang Shuichang, Huang Haiping. Geochemistry of Palaeozoic marine petroleum from the Tarim Basin, NW China: part 1: oil family classification [J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36: 1204–1214.
- [5] 张水昌, 张宝民, 王飞宇, 等. 塔里木盆地两套海相有效烃源层[J]. *自然科学进展*, 2001, 11(3): 261–268.
- Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Wang Feiyu, et al. Two sets of effective marine source rocks in Tarim Basin [J]. *Progress in Natural Science*, 2001, 11(3): 261–268.
- [6] 刘洛夫, 赵建章, 张水昌, 等. 塔里木盆地志留系沥青砂岩的成因类型及特征[J]. *石油学报*, 2000, 21(6): 12–17.
- Liu Luofu, Zhao Jianzhang, Zhang Shuichang, et al. The origin type and characteristics of the Silurian bituminous sandstone in Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(6): 12–17.
- [7] 刘洛夫, 赵建章, 张水昌, 等. 塔里木盆地志留系沥青砂岩的形成期次及演化[J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 475–479.
- Liu Luofu, Zhao Jianzhang, Zhang Shuichang, et al. The formation stages and evolution of the Silurian bituminous sandstone in Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 475–479.
- [8] 郭建军, 陈践发. 塔中志留系沥青砂岩的地质特征及研究进展[J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(2): 151–155.
- Guo Jianjun, Chen Jianfa. Geologic feature and study progress of silurian asphaltic sandstone in Tazhong Area, Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(2): 151–155.
- [9] 宫色, 彭平安, 卢玉红, 等. 生物降解沥青砂再次热作用的实验模拟[J]. *科学通报*, 2004, 49(增刊 I): 39–47.
- Gong Se, Peng Pingan, Lu Yuhong, et al. The model experiments for secondary pyrolysis of biodegraded bituminous sandstone [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(Supp I): 39–47.
- [10] 霍立秋, 冯子辉, 付丽. 非烃和沥青质热模拟生烃研究[J]. *地质地球化学*, 2002, 30(3): 64–67.
- Huo Lili, Feng Zihui, Fu Li. Hydrocarbon generation of non-hydrocarbon and asphaltene in thermal simulated experiment [J]. *Geology-Geochemistry*, 2002, 30(3): 64–67.
- [11] 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[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(2): 8–12.
- Zhang Shuichang, Liang Digang, Zhang Dajiang. Evaluation criteria for Paleozoic effective hydrocarbon source rocks [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(2): 8–12.
- [12] Behar F, Lorant F, Mazeas L. Elaboration of a new compositional kinetic schema for oil cracking[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39: 764–782.
- [13] Waples D W. The kinetics of in-reservoir oil destruction and gas formation: constraints from experimental and empirical data, and from thermodynamics [J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31: 553–575.
- [14] 何坤, 张水昌, 米敬奎. 原油裂解的动力学及控制因素研究[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(2): 211–218.
- He Kun, Zhang Shuichang, Mi Jingui. Research on the kinetics and controlling factors for oil cracking [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(2): 211–218.
- [15] 王晓梅, 张水昌. 轮南地区天然气分布特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(2): 204–209.
- Wang Xiaomei, Zhang Shuichang. Distribution and genesis of natural gas in Lunnan area [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(2): 204–209.
- [16] 陈践发, 苗忠英, 张晨, 等. 塔里木盆地塔北隆起天然气轻烃地球化学特征及应用[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(3): 271–276.
- Chen Jianfa, Miao Zhongying, Zhang Chen, et al. Geochemical characteristics of light hydrocarbons in natural gas in the Tabei Uplift of the Tarim Basin and their implications [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(3): 271–276.
- [17] 刘全有, 戴金星, 刘文汇, 等. 塔里木盆地天然气中氮地球化学特征与成因[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(1): 12–17.
- Liu Quanyou, Dai Jinxing, Liu Wenhui, et al. Geochemical characteristics and genesis of nitrogen in natural gas from Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(1): 12–17.

(编辑 张亚雄)