

致密火山岩物性影响因素分析与储层质量预测 ——以马朗-条湖凹陷条湖组为例

孟元林¹, 胡越¹, 李新宁², 胡安文¹, 吴晨亮³, 赵紫桐¹, 张磊¹, 许丞¹

(1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油 吐哈油田公司 研究院, 新疆 哈密 839009;

3. C & C Reservoirs Inc., Houston, TX 77036, 美国)

摘要:在三塘湖盆地马朗-条湖凹陷条湖组二段晶屑玻屑沉凝灰岩致密储层中发现了工业油流。为了研究致密油的分布规律,通过研究岩相和成岩作用对火山岩储层物性的影响,进行了成岩作用数值模拟,结合条湖组二段的岩相图,预测了4类储层在平面上的分布。结果表明,角砾岩和凝灰岩的物性最好,玻屑晶屑沉凝灰岩和火山碎屑沉积岩的物性次之,熔岩的物性最差;随成岩作用的增强,储层的物性变差,储层物性是岩性和成岩作用综合作用的结果。常规储层(孔隙度 $\geq 9\%$)分布在马朗-条湖凹陷的南部,低致密储层($7\% \leq \text{孔隙度} < 9\%$)和高致密储层($4\% \leq \text{孔隙度} < 7\%$)分布在凹陷的中北部。在常规储层分布区,以寻找有效圈闭为主;而在致密储层分布区,则应注重储层和烃源的研究。

关键词:沉凝灰岩;致密油;储层预测;火山岩储层;条湖组;三塘湖盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Controlling factors on physical property of tight volcanic rocks and reservoir quality prediction: a case study of the Tiaohu Formation in Marlang-Tiaohu Sag

Meng Yuanlin¹, Hu Yue¹, Li Xinning², Hu Anwen¹, Wu Chenliang³, Zhao Zitong¹, Zhang Lei¹, Xu Cheng¹,

(1. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Institute of Tuha Oilfield Company, Petrochina, Hami, Xinjiang 839009, China; 3. C & C Reservoirs Inc., Houston, TX 77036, USA)

Abstract: Commercial oil flows were tested in the tight vitric and crystal sedimentary tuff reservoirs of the 2nd Member of Tiaohu Formation (P_2t^2) in Marlang-Tiaohu Sag, Santanghu Basin. In order to reveal the distribution pattern of tight oil, we studied the influences of lithofacies and diagenesis on physical properties of volcanic reservoirs. And plane distribution of four types tight reservoir of P_2t^2 were predicted through numerical modeling of diagenesis and in combination with lithofacies map. The results show that the quality volcanic reservoir decreases with increasing levels of diagenesis; Pyroclastic rock and tuff are optimal reservoirs, followed by vitric and crystal sedimentary tuffs and pyroclastic rocks, and lavas show the worst reservoir property. The conventional reservoirs (porosity $\geq 9\%$) distribute in the southern Marlang-Tiaohu Sag, and slight tight reservoirs ($7\% \leq \text{porosity} < 9\%$) and strong tight reservoirs ($4\% \leq \text{porosity} < 7\%$) are located in the central-northern of Marlang-Tiaohu Sag. Effective traps are the main exploration targets in area with conventional reservoirs, while the reservoirs and hydrocarbon source should be the focuses of study in area with tight reservoirs.

Key words: sedimentary tuff, tight oil, reservoir quality prediction, volcanic reservoir, Tiaohu Formation, Santanghu basin

三塘湖盆地马朗-条湖凹陷位于新疆维吾尔自治区境内,在近期的非常规油气勘探中,取得实质性突破, Lu1, M55, M56 和 M57H 井在条湖组二段钻遇沉凝灰岩层,良好显示。压裂后,3口井获工业油流。复查了16口老井,共发现18个油层,累积191.5 m。压裂改造后试油,6口井有5口井产出工业油流,1口井产出低产油

流。致密油一般指储集在覆压基质渗透率小于或等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密砂岩、致密碳酸盐岩等储集层中的石油^[1-2]。而条湖组中发现的致密油储集在沉凝灰岩中,其岩性与国内其他盆地的致密油储层不同,其成储特征和成藏规律可能与碎屑岩和碳酸盐也有一定差异。由于火山岩主要由不稳定的矿物组成,所以它们在

收稿日期:2013-12-20;修订日期:2014-02-10。

第一作者简介:孟元林(1960—),男,教授、博士生导师,储层与成岩。E-mail:QHDMYL@163.com。

基金项目:国家自然联合基金项目(U1262106);中石油重大专项(2012E-34-08);国家青年自然科学基金项目(41202101)。

埋藏成岩过程中的变化更大。一般来说,火山岩储集性能较好,特别是后期经构造运动和溶蚀作用形成的孔、洞、缝将原生气孔等储集空间连通^[3]。但也不乏像徐家围子断陷深层营城组这样的致密火山岩储层^[4]。在国外也有一些关于致密火山岩储层的报道,如印度尼西亚的贾蒂巴朗、美国的亚利桑那、格鲁吉亚的萨母戈里-帕塔尔祖利和乌克兰的外喀尔巴阡等^[3-9]。在条湖组除了发育致密储层之外,还有常规储层,两种储层并存。但不同的储层具有不同的勘探思路,对于常规储层需要遵循以寻找圈闭为中心的勘探思想;而对于致密储层,油气的分布不受圈闭控制,在盆地的凹陷区和斜坡区连续分布,勘探工作遵循寻找优质储层和烃源的勘探理念^[1],可通过钻前储层质量预测(predrilling reservoir quality prediction)技术预测优质储层分布区,进一步确定有利的勘探区^[10-11]。有关钻前碎屑岩储层质量预测的研究比较多^[10-14],但有关火山岩储层质量预测方面的研究尚少。本文试图探讨岩性和成岩作用对火山岩(尤其是火山碎屑岩)储层物性的控制作用,应用成岩作用数值模拟技术,在横向上预测成岩阶段,结合条湖组的岩相图,预测火山岩储层质量在平面上的变化规律,以便对不同的储层采取不同的勘探方法,为三塘湖盆地条湖组,乃至我国西部其他盆地致密油的勘探,提供科学的依据。

1 地质概况

三塘湖盆地是一个在早古生代基底上发展起来的叠合型盆地,面积约 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该盆地由东北冲断隆起带、中央拗陷带和西南逆冲推覆隆起带组成。中央拗陷带面积约 $8\,000 \text{ km}^2$,是三塘湖盆地油气聚集的主要构造单元,又进一步划分为乌通凹陷,小青凸起、汉水泉凹陷、沙河坝凸起、条湖凹陷、岔哈泉凸起、马朗凹陷、方方梁凸起、淖毛湖凹陷、苏鲁克凹陷10个二级构造单元^[15]。盆地沉积盖层包括二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系与新近系。二叠系仅发育中二叠统,从下到上分为芦草沟组和条湖组。芦草沟组是三塘湖盆地一套优质烃源岩,为芦草沟组、条湖组、中下侏罗统和中上三叠统提供了丰富的油源^[16]。芦草沟组烃源岩的有机质类型为I-II₁型,有机碳含量(TOC)介于1.03%~5.80%,镜质体反射率(R_o)主要分布在0.5%~1.3%。条湖组由3个岩性段组成,条湖组一段和三段以玄武岩或安山岩为主,岩性不纯,夹少量薄层凝灰质泥岩。条二段主要为火山角砾岩、火山碎屑沉积岩、晶屑玻屑沉凝灰岩、火山熔岩、凝灰质泥岩和煤系泥岩。目前已发现的致密油流主要产自条二段玻屑晶屑沉凝灰岩。

2 岩性与物性特征

2.1 岩性和岩相特征

马朗-条湖凹陷条二段储层主要是一套中基性的火山岩(图1)^[15]。火山熔岩主要为安山岩和玄武岩(图2a)。火山碎屑岩由普通火山碎屑岩、沉积火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩组成,包括火山角砾岩、凝灰岩、凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩、凝灰质泥岩、晶屑玻屑沉凝灰岩(图2b-f),晶屑以斜长石为主。

三塘湖盆地条二段火山碎屑岩最大的特征是粒度较细(图2b-d),44块样品的粒度分析结果表明,80.56%的样品粒径小于0.25 mm,相当于泥-细砂的粒级;有59.4%样品的粒径小于0.062 5 mm,和粉砂与泥的粒径相当。

2.2 物性特征和孔隙结构特征

由于火山碎屑岩的粒度较细,所以其孔喉半径较小,主要发育微孔(图2b,c,e)和孔喉半径小于 $1 \mu\text{m}$ 的纳米级孔喉(图2e)。20块样品压汞的统计结果表明,纳米级孔喉占88.3%。

较细的孔喉导致了储层较低的渗透率和相对较高的孔隙度,411块样品的统计结果表明(表1),渗透率分布在 $0.05 \times 10^{-3} \sim 122.39 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度分布在0.4%~27.8%。渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占84.84%。由此可见,条湖组大部分火山岩属于致密储层,但也发育少部分常规储层。根据我国石油与天然气行业致密储层的标准,致密储层是指覆压基质渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层^[2]。为了确定致密储层的孔隙度上限,本文研究了马朗-条湖凹陷覆压基质渗透率与地表孔隙度之间的相关性(图3)。由图可见,当覆压基质渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,地表孔隙度为9%左右。也就是说,条湖组致密储层的物性上限是9%。

3 火山岩储层物性的主要影响因素

已有的研究表明,影响火山岩储层孔隙度和渗透率的主要地质因素有岩性岩相、构造作用、火山岩的埋深及其所处的成岩阶段^[17-23]。构造作用可以形成裂缝,使火山岩储层的物性变好。但对致密储层而言,主要研究的是基质孔隙度和渗透率。因此,三塘湖盆地火山岩储层孔隙度和渗透率的主要影响因素,就可归结为岩性相和火山岩所处的成岩阶段及其埋深。

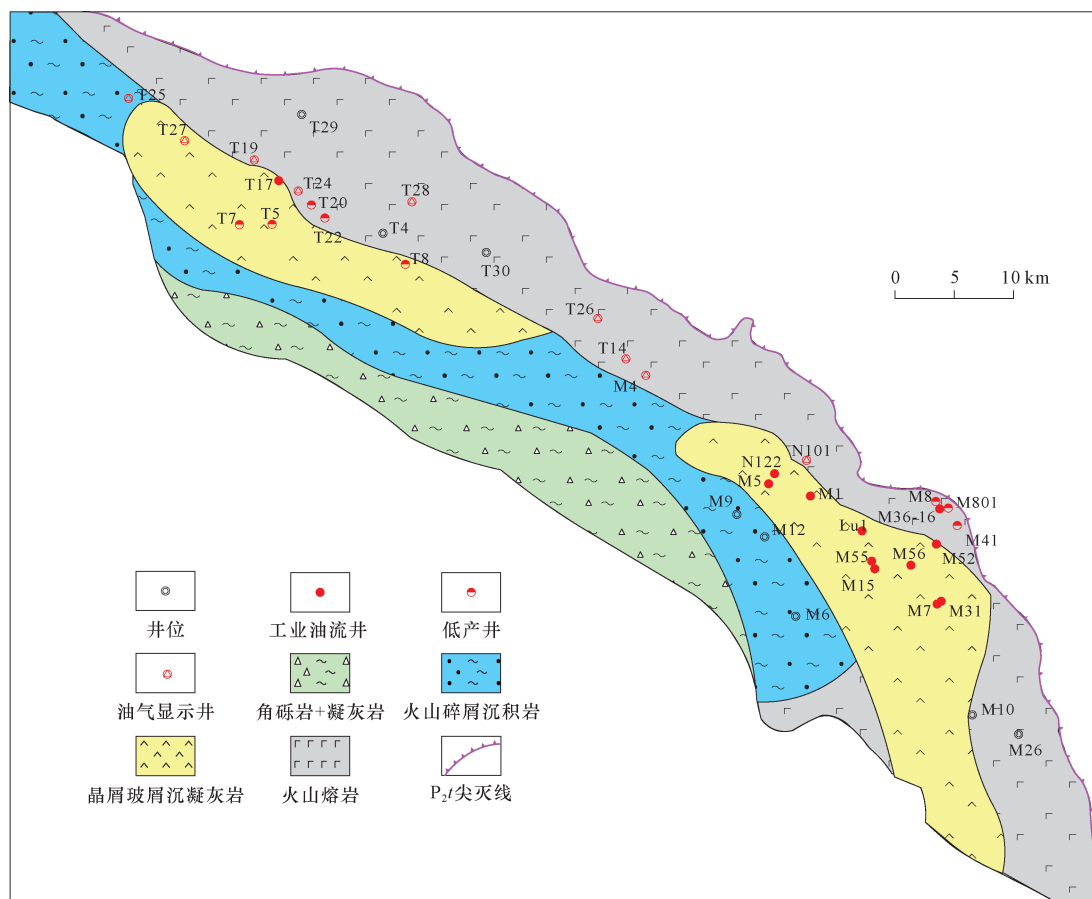


图1 三塘湖盆地马朗-条湖凹陷条湖组二段岩相

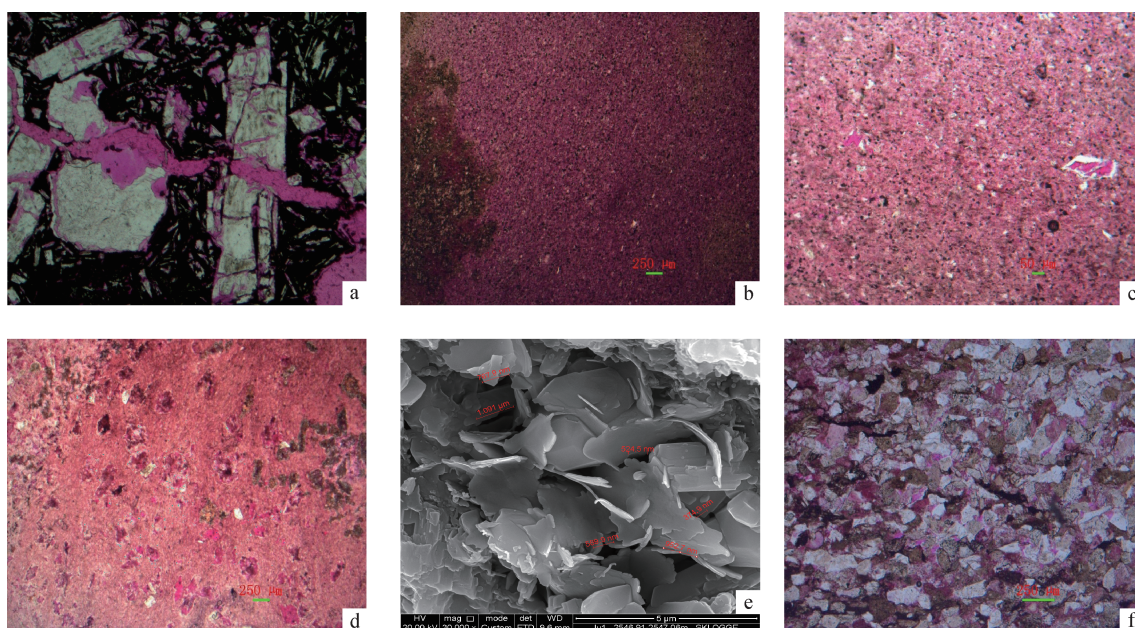
Fig. 1 Lithofacies map of P_2t^2 in the Malang-Tiaohu Sag of Santanghu Basin

图2 条湖组火山岩储层微观照片

Fig. 2 Microscopic photos of volcanic reservoirs of P_2t

- a. T19井,玄武岩,杏仁构造,杏仁体内溶孔,斑晶溶孔,2 703.51~2 703.65 m,铸体(-); b. M56井,玻屑凝灰岩,玻屑微孔,2 144.86~2 144.99 m,铸体(-); c. M56井,玻屑凝灰岩,玻屑微孔,晶屑溶孔,2 141.87~2 141.97 m,铸体(-); d. M56井,碳酸盐化晶屑凝灰岩,晶屑溶孔,2 144.99~2 145.13 m,铸体(-); e. Lu1井,粒间微孔发育,凝灰岩,2 546.912~547.06 m,场发射环境扫描电镜; f. M55井,粒间孔,方解石充填孔隙,晶屑岩屑凝灰岩,2 267.40~2 267.56 m,铸体(-)

表 1 条湖组不同岩性的孔隙度和渗透率
Table 1 Porosity and permeability of different volcanic reservoirs in P₂f²

岩相	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	储层物性分类
凝灰岩和角砾岩	0.4~24	0.005 4~122.39	Ⅰ类
	11.18(132)	5.53(67)	
晶屑玻屑凝灰岩	0.9~27.8	0.005~120.57	Ⅱ类
	8.82(345)	2.69(284)	
火山碎屑沉积岩	0.4~15.8	0.05~5.13	Ⅲ类
	6.77(61)	0.72(27)	
火山熔岩	0.9~11.2	0.05~8.66	Ⅳ类
	5.29(51)	0.69(33)	

注:表中数据为最小值~最大值
平均值(样品数)。

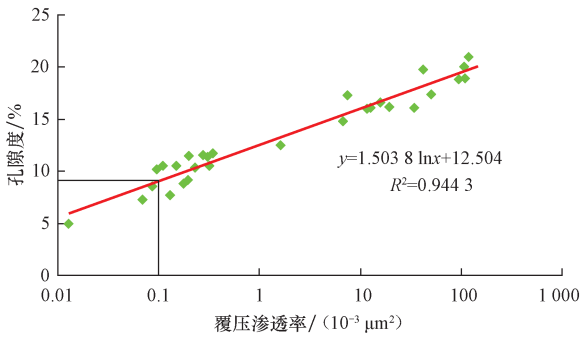


图 3 覆压基质渗透率与地表孔隙度关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between matrix permeability and surface porosity

3.1 岩性和岩相对储层物性的影响

条湖组岩性和岩相对火山岩储层的物性具有明显的控制作用,凝灰岩和角砾岩的物性最好,晶屑玻屑凝灰岩和火山碎屑沉积岩的物性次之,火山熔岩最差(表 1)。4 种岩相火山岩的孔隙度分别为 11.18%, 8.82%, 6.77% 和 5.29%, 渗透率分别为 5.53×10^{-3} , 2.69×10^{-3} , 0.72×10^{-3} 和 $0.69 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

根据贾承造提出的我国致密油储层物性分类标准^[24],本文将三塘湖盆地条湖组的储层分为 4 类:Ⅰ类储层的孔隙度 $\geq 9\%$,孔隙流体服从达西定律,属于常规储层;Ⅱ类储层的孔隙度介于 $7\% \sim 9\%$,属于低致密储层;Ⅲ类储层的孔隙度在 $4\% \sim 7\%$ 之间,属于高致密储层;Ⅳ类储层的孔隙度小于 4% ,属于差储层。根据这一储层物性划分标准,条湖组的角砾岩和凝灰岩属于Ⅰ类储层,晶屑玻屑凝灰岩属于Ⅱ类储层,火山碎屑沉积岩和火山熔岩整体上属于Ⅲ类储层(表 1)。

火山岩的岩性和岩相对储层的含油性也具有一定的控制作用,目前所发现的工业油流井绝大多数分布在玻屑晶屑凝灰岩中(图 1)。

3.2 成岩作用对火山岩储层物性的控制

机械压实作用、胶结作用和充填作用是条湖组火山岩储层主要的破坏性成岩作用,可使储层的孔隙度

减小,形成致密储层(图 2b, f)。溶蚀作用、脱玻化作用和交代作用是条湖组储层的主要建设性成岩作用,可使火山岩储层的孔隙度增加(图 2c, d)。但总的来看,随埋深和地温的增加,成岩作用增强,火山岩的孔隙度降低^[17-23],其原因是:随埋深和地温的升高,泥岩中的粘土矿物发生转化,排出大量 Si^{4+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} 和 Na^+ , 进入相邻的火山岩孔隙中,当孔隙流体的离子浓度达到饱和之后,以矿物质的形式沉淀下来,胶结火山碎屑岩的颗粒,充填火山熔岩的孔隙,使其孔隙度不断减小^[23]。

为了研究三塘湖盆地马朗-条湖凹陷成岩作用对火山岩储层孔隙度的影响,在镜质体反射率(R_o)、孢粉颜色 TAI、色谱-质谱、热解分析、X-衍射、普通薄片、铸体薄片、扫描电镜、电子探针等分析化验的基础上,依据石油行业标准(SY/T 5477—2003)碎屑岩成岩阶段划分规范^[25],对三塘湖盆地马朗-条湖凹陷的碎屑岩和火山碎屑岩进行了成岩阶段划分(表 2)。

在早成岩阶段 A 期,成岩作用以机械压实为主,发育早期压实相,储层弱固结-半固结,碎屑颗粒间呈悬浮接触,储层主要发育原生粒间孔。在早成岩阶段 B 期,胶结作用增强,以碳酸盐胶结和粘土胶结为主,发育早期胶结相。在该阶段的晚期,有机质开始发生热降解,脱去含氧官能团,形成有机酸,溶蚀长石和玻屑形成次生孔隙。在中成岩阶段 A₁ 亚期, $R_o = 0.5\% \sim 0.7\%$, 有机质进入生油门限,在生成油气的同时,形成大量有机 CO_2 和有机酸,溶蚀储层,形成孔次生孔隙(图 2c, d),发育早期溶蚀相。

值得说明的是,根据三塘湖盆地的具体地质特征,在石油与天然气行业标准(SY/T 5477—2003)的基础上,本文以生油高峰($R_o = 1.0\%$)为界,将中成岩阶段 A₂ 亚期进一步细分为中成岩阶段 A₂¹、中成岩阶段 A₂²。划分依据是,三塘湖盆地马朗-条湖凹陷烃源岩达到生油高峰之后,干酪根中的杂原子键断裂减缓,脱羧作用基本完成,表现在干酪根 O/C 原子比的减小速度变慢(图 4)。从此之后,有机酸的生成量较小,储层的溶蚀作用减弱,孔隙度下降。也就是说,芦草沟组烃源岩有机酸的生成和排出主要发生在生油高峰之前。值得注意的是,在生油高峰之后,不同类型干酪根 O/C 原子比下降的速率差异很大,反映其产酸能力不同。其中Ⅰ型干酪根和Ⅱ型干酪根在生油高峰之后, O/C 原子比下降的速率很小,说明其产酸能力在生油高峰之后就很差了,我国松辽盆地中浅层和渤海湾盆地辽河西部凹陷古近系就是如此,由有机酸溶蚀储层形成的次生孔隙发育带主要分布在生油高峰对应的深度之上^[26-27]。而对于Ⅲ型干酪根则明显不同,即使在生油高峰之后,仍能脱羧(图 4),产出大量有机酸,溶蚀储

表 2 马朗-条湖凹陷成岩特征和成岩阶段划分

Table 2 Diagenetic characteristics and diagenetic stages of Malang-Tiao Sag

成岩阶段	成岩相	I_D	现今温度 ($^{\circ}\text{C}$)	有机质					泥岩		自生矿物										溶解作用		接触类型	深度 (m)
				$R_o/\%$	孢粉颜色 TAI	SI	$T_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$	成熟带	有机酸	I/S中 S含量/%	I/S 类型分布	蒙皂石	伊蒙混层	高岭石	伊利石	绿泥石	方解石	含铁方解石	白云石	铁白云石	长石及 岩屑	碳酸盐		
早成岩	A	早期 压实相	0.19	33	0.35	2.5	0.24	435	未成熟		85	蒙皂石带												~1000
	B	早期 胶结相	0.32	44	0.50	2.6	0.25	437	半成熟		45	渐变带												~1500
中成岩	A ₁	早期 溶蚀相	0.43	64	0.70	3.0	0.28	440	低熟		30	部分有序混层												~2200
	A ₁ ¹	中期 溶蚀相	0.56	98	1.00	4.0	0.40	446																~3600
	A ₂	晚期 溶蚀相	0.72	110	1.30	5.0	0.52	460	成熟		15	完全有序混层												~4100
	B	晚期 胶结相	1.00	>110	2.00	>5.0	>0.52	490	高成熟		<15	超点阵有序混层带												>4100

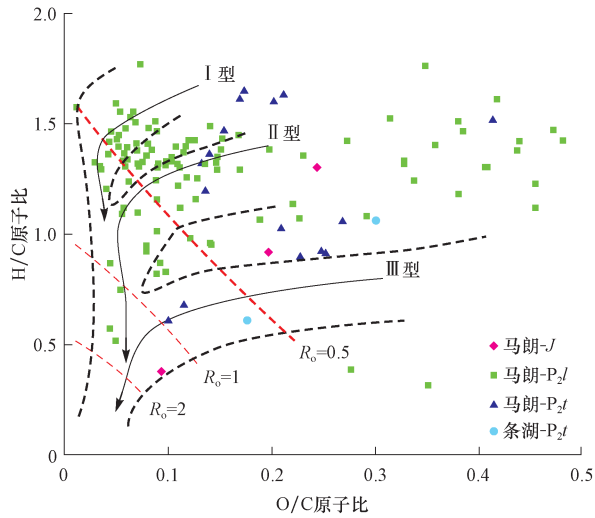


图 4 马朗-条湖凹陷芦草沟组烃源岩干酪根元素组成与有机质热演化

Fig. 4 Elementary composition of kerogen and thermal evolution of organic matter in Malang-Tiaohu Sag

层,形成次生孔隙,例如:松辽盆地徐家围子断陷深层沙河子组的Ⅲ型干酪根在 R_o 大于1.3%之后,仍可生成和排出有机酸,溶蚀深部的砂砾岩和火山岩储层,形成异常高孔带,天然气注入其中,形成了庆深气田^[28]。

进一步的统计表明,随成岩作用的增强,三塘湖盆地马朗-条湖凹陷条湖组的储层物性明显变差,条湖组处于早成岩阶段B期、中成岩阶段A₁亚期、中成岩阶段

A₂¹和中成岩阶段A₂²的储层孔隙度分别为9.35%、9.18%和8.34%(表3),渗透率分别为 0.49×10^{-3} 、 0.457×10^{-3} 和 $0.61 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

4 储层质量预测

4.1 预测原理

为了更好地研究岩性和埋藏成岩作用对储层物性的综合影响,本文统计了三塘湖盆地马朗-条湖凹陷条湖组不同成岩阶段所对应深度段各种岩性的孔隙度和渗透率(表4)。这样,就既可以在成岩强度和埋深相近的条件下,讨论岩性对火山岩储层物性的影响,也

表 3 条湖组成岩作用对储层物性的影响

Table 3 Impacts of diagenesis on reservoir porosity and permeability of Tiaohu Formation

成岩阶段	深度/m	$R_o/\%$	孔隙度*/ %	渗透率*/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	储层物性 分类
早成岩阶段 B	1 000 ~	0.35 ~	7.9 ~ 11.9	0.05 ~ 1.7	I 类
	(早期胶结相) 1 500	0.5	9.35 (14)	0.49 (13)	
中成岩阶段 A ₁	1 500 ~	0.5 ~	0.9 ~ 24.5	0.005 ~ 122.39	I 类
	(早期溶蚀相) 2 200	0.7	9.18 (353)	0.457 (234)	
中成岩阶段 A ₂ ¹	2 200 ~	0.7 ~	0.4 ~ 27.8	0.005 ~ 46.5	II 类
	(中期溶蚀相) 3 600	1.1	8.34 (222)	0.61 (164)	

* 数据表示最小值~最大值
平均值(样品数)。

表4 条湖组岩相和成岩作用对储层物性的综合影响与储层分类

Table 4 Integrated effects of lithofacies and diagenesis on porosity and permeability of reservoirs of Tiaohu Formation

成岩阶段	岩相	孔隙度/%	物性分类代号	储层分类
中成岩阶段 A ₁ 亚期 (早期溶蚀相)	凝灰岩和 角砾岩	0.9 ~ 22.1 11.52(69)	I	常规储层
中成岩阶段 A ₂ ¹ (中期溶蚀相)		0.4 ~ 24 10.81(63)		
早成岩阶段 B 期 (早期胶结相)	火山碎屑 沉积岩	7.9 ~ 11.9 9.35(4)		
中成岩阶段 A ₁ 亚期 (早期溶蚀相)	晶屑玻屑 沉凝灰岩	0.9 ~ 24.5 8.94(238)	II	低致密 储层
中成岩阶段 A ₂ ¹ (中期溶蚀相)		2.1 ~ 27.8 8.56(107)		
早成岩阶段 B 期 (早期胶结相)	火山熔岩	6.7 ~ 9.5 7.46(10)		
中成岩阶段 A ₁ 亚期 (早期溶蚀相)	火山碎屑 沉积岩	2.3 ~ 10.1 7.28(33)	III	高致密 储层
中成岩阶段 A ₁ 亚期 (早期溶蚀相)	火山熔岩	0.9 ~ 11.2 5.99(13)		
中成岩阶段 A ₂ ¹ (中期溶蚀相)	火山碎屑 沉积岩	0.4 ~ 15.8 5.63(24)		
中成岩阶段 A ₂ ² (晚期溶蚀相)	火山熔岩	1.2 ~ 10.2 4.23(28)	IV	差储层
	火山熔岩	<4		

注:表中数据为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值(样品数)}}$ 。

可以讨论同一岩性在不同埋深和成岩阶段中火山岩储层的物性。由表4可见,①岩性对火山岩储层的物性具有明显的影响,例如:同处于中成岩阶段 A₁ 亚期的储层,凝灰岩和角砾岩、晶屑玻屑沉凝灰岩、火山碎屑沉积岩和火山熔岩的孔隙度依次为 11.52%, 8.94%, 7.28% 和 5.99%, 由 I 类储层, 经 II 类储层, 变为 III 类储层。②成岩作用对储层物性具有显著的控制作用, 随埋藏深度的增加和成岩作用的增强, 储层的物性变差。例如:当火山碎屑沉积岩分别处于相邻碎屑岩早成岩阶段 B、中成岩阶段 A₁ 亚期和中成岩阶段 A₂¹ 所对应的深度时, 其孔隙度分别为 9.35%, 7.28% 和 5.63%, 分别为 I 类、II 类和 III 类;③各种岩相的储层处于不同的埋藏深度段和成岩阶段, 就构成了不同类型(I, II, III 和 IV 类)的火山岩储层, 马朗-条湖凹陷条湖组储层的物性是岩相和地史时期各种成岩作用综合影响的结果。

由上可见, 处于相同成岩阶段、而且属于同一岩相的储层, 其类型和质量相同, 物性相近。因此, 依据表4中各种岩性处于不同成岩阶段所对应的不同类型储层, 就可以通过叠合三塘湖盆地条湖组岩相图和相应的碎屑岩成岩阶段预测图, 预测储层类型和质量在平面上的分布特征。

4.2 碎屑岩成岩阶段横向预测

为了在横向上预测成岩阶段, 本文综合考虑地层

时代、岩性、古气候、构造运动对成岩作用的影响, 选取成岩阶段划分常用、在目前的技术条件下能够定量, 模拟的成岩参数镜质体反射率(R_o)、甾烷异构化指数 SI [C_{29} 甾烷 $S/(R+S)$]、伊/蒙混层中蒙皂石层的含量 S 、自生石英含量 V_q 、古地温 T , 分别模拟其随时间的变化规律^[29-34], 并构建成岩指数 I_D , 在时空领域内进行成岩作用数值模拟, 由计算机自动划分成岩阶段^[35]:

$$I_D(x, y, z, t) = a_1 T(x, y, z, t)/T_B + a_2 R_o(x, y, z, t)/R_B + a_3 [100 - S(x, y, z, t)]/(100 - S_B) + a_4 SI(x, y, z, t)/SI_B + a_5 V_q(x, y, z, t)/V_B \quad (1)$$

式中: I_D 是成岩指数; t 为时间, Ma; x, y, z 为三维空间坐标; a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 分别代表成岩指标 T, R_o, S, SI, V_q 的权值, 本文分别取 0.2, 0.5, 0.1, 0.1, 0.1, 其总和为 1.0; T_B, R_B, S_B, SI_B, V_B 分别为 T, R_o, S, SI, V_q 在中成岩阶段 B₂ 亚期末的值(表1), 分别取 175 °C, 2.00%, 5%, 0.52, 12%。

将 T, R_o, SI, S, V_q 在各成岩阶段底界的数值代入式(1), 就得到了不同成岩阶段对应的 I_D 值(表2)。在早成岩阶段 A 期、B 期、中成岩阶段 A₁ 亚期、中成岩阶段 A₂¹、中成岩阶段 A₂² 和中成岩阶段 B 期末的成岩指数 I_D 分别为 0.19, 0.32, 0.43, 0.56, 0.72 和 1.00。

本文首先以三塘湖盆地马朗-条湖凹陷的三维地震资料和钻井资料为基础, 建立了成岩模拟网格, 网格中各节点(“人工井”)之间的距离为 0.5 km; 然后, 应用成岩作用数值模拟与优质储层预测系统^[35], 模拟了网格中各“人工井”不同地质时期 T, R_o, SI, S 和 V_q 随时间的变化规律, 并应用式(1)计算成岩指数 I_D , 得到三塘湖盆地马朗-条湖凹陷各研究目的层在不同地质时期的成岩指数 I_D 等值线图。图5是马朗-条湖凹陷现今条二段成岩阶段预测。由图可见, 从南到北成岩作用增强, 由早成岩阶段 B 期($I_D < 0.32$), 经中成岩阶段 A₁ 亚期($0.32 \leq I_D < 0.43$) 和中成岩阶段 A₂¹($0.43 \leq I_D < 0.56$), 过渡到中成岩阶段 A₂²($I_D \geq 0.56$)。各种成岩相呈条带状展布, 由南到北依次发育早期胶结相、早期溶蚀相、中期溶蚀相、晚期溶蚀相。这些成岩相在纵向上相邻(表2), 在横向上也相邻(图5)。我们将这一规律称为“成岩相律”。目前, 已发现的工业油流井和低产油流井主要分布在中期溶蚀相, 其次为早期溶蚀相(图5)。成岩相对条二段的含油性具有一定控制作用。

4.3 储层质量和类型平面预测

依据表4中不同岩相处于不同成岩阶段所对应的储层类型, 本文通过叠合条二段岩相分布图(图1)和成岩阶段预测图(图5), 预测了条二段储层类型和质量在平面上的分布(图6)。由图6和表4可见, I 类

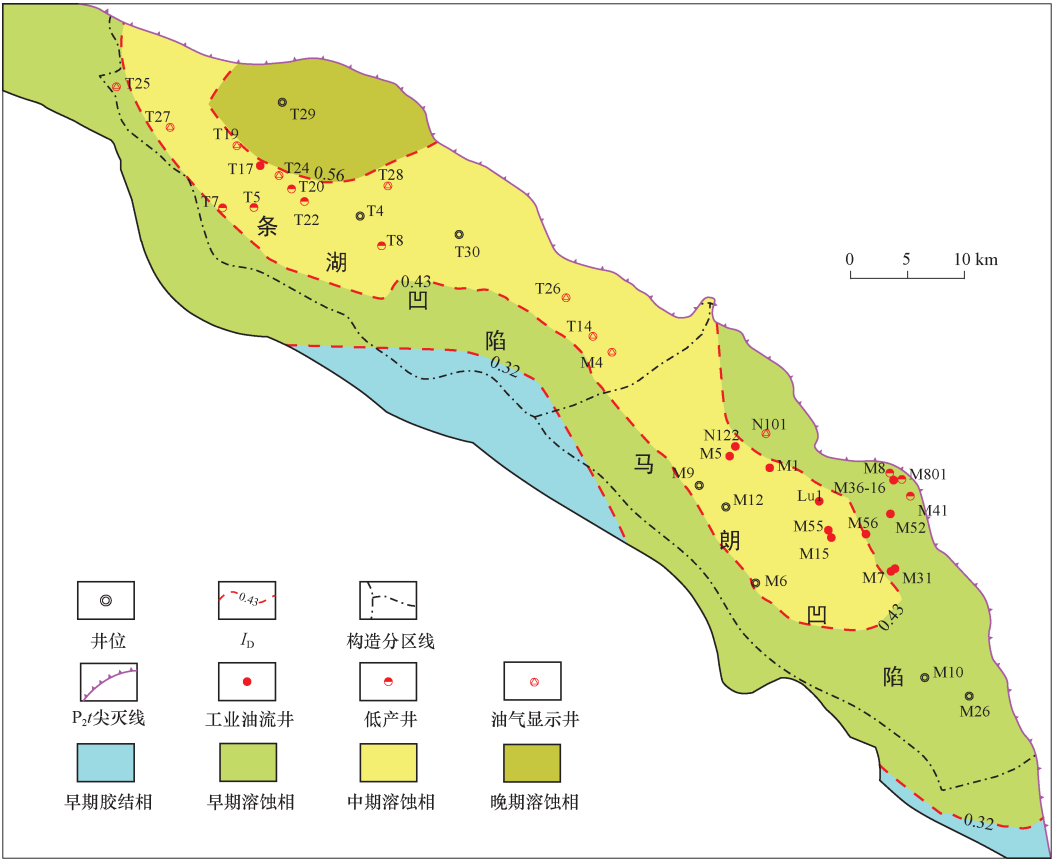


图5 马朗-条湖凹陷条湖组二段成岩阶段和成岩相预测

Fig. 5 Prediction of diagenetic stage and diagenetic facies of P_2t^2 in Malang-Tiaohu Sag

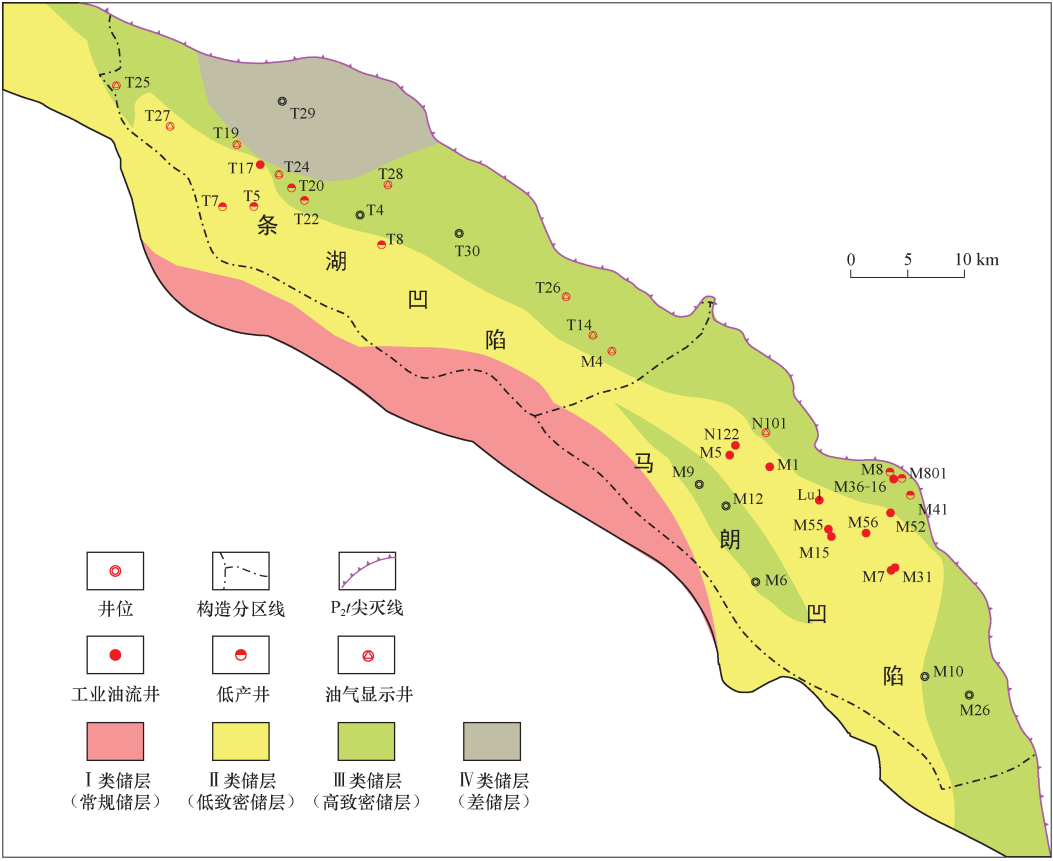


图6 马朗-条湖凹陷条湖组二段储层类型与质量预测

Fig. 6 Prediction of reservoir types and quality of P_2t^2 in Malang-Tiaohu Sag

储层包括目前处于早成岩阶段 B 期的火山碎屑沉积岩和处于中成岩阶段 A_1 亚期 - A_2^1 的凝灰岩与火山角砾岩。这些储层主要分布在马朗 - 条湖凹陷条二段埋藏相对较浅的南部地区,属于常规储层,孔隙度 $\geq 9\%$,流体的运移服从达西定律,油气的聚集遵循重力分异原理。在这一地区的勘探,应以寻找有效圈闭为主。II 类储层分布在马朗 - 条湖凹陷埋深相对较大的地区,但其孔隙度介于 $7\% \sim 9\%$,属于低致密程度储层,由处于早成岩阶段 B 期的火山熔岩、中成岩阶段 A_1 亚期的晶屑玻屑沉凝灰岩或火山碎屑沉积岩和处于中成岩阶段 A_2^1 的晶屑玻屑沉凝灰岩构成。III 类储层主要分布在马朗 - 条湖凹陷北部和中部埋深较大的地区,是那些处于中成岩阶段 A_1 亚期 - 中成岩阶段 A_2^1 的火山熔岩和处于中成岩阶段 A_2^1 的火山碎屑沉积岩,其孔隙度在 $4\% \sim 7\%$,属于高致密储层。在 II、III 类储层分布区,油气的聚集不受圈闭的控制,致密油呈连续型分布,勘探应遵循以储层和烃源岩为中心的勘探理念。IV 类储层仅分布在条湖凹陷的最北端,条二段不仅成岩作用强(中成岩阶段 A_2^2),而且岩性差(火山熔岩),目前尚未发现工业油流和低产油流。

5 结论

1) 从盆地边部到中央,条二段成岩作用逐渐增强,依次发育早期胶结相、早期溶蚀相、中期溶蚀相和晚期溶蚀相,纵向上相邻的成岩相横向上也相邻,这一规律可以称为“成岩相律”。已发现的油流井主要分布在中期溶蚀相和早期溶蚀相。

2) 条湖组储层物性的主控因素是岩相和所处的成岩阶段,通过叠合岩相分布图和成岩阶段预测图,可以在横向上预测储层的类型和质量。目前已发现的工业气流井主要位于低致密储层(II 类)和高致密(III 类)储层分布区。

3) 在 I 类储层分布区,应遵循以寻找圈闭为中心的勘探思路;在 II 类和 III 类储层分布区,则应注重储层和烃源的研究。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,非常规油气地质(第二版)[M]. 北京:石油工业出版社,2013:41.
Zou Caineng, Unconventional Petroleum Geology (second edition) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [2] 国家能源局. 致密砂岩气地质评价方法(SY/T 6832—2011) [S]. 北京:石油工业出版社,2011:1-5.
National Energy Bureau. Geological evaluating methods for tight sandstone gas(SYT 6832 - 2001) [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [3] 罗静兰,邵红梅,张成立. 火山岩油气藏研究方法与勘探技术综

述[J]. 石油学报,2003,24(1):31-38.

Luo Jinglan, Shao hongmei, Zhang Chengli. Summary of research methods and exploration technologies for volcanic reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(1): 31-38.

- [4] 邹才能,赵文智,贾承造,等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. 石油勘探与开发,2008,35(3):257-271.
Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Jia Chengzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 257-271.
- [5] 朱如凯,毛治国,郭宏莉,等. 火山岩油气储层地质学 - 思考与建议[J]. 岩性油气藏,2010,22(2):7-13.
Zhu Rukai, Mao Zhiguo, Guo Hongli, et al. Volcanic oil and gas reservoir geology: thinking and forecast[J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(2): 7-13.
- [6] 王璞珺,冯志强. 盆地火山岩[M]. 北京:科学出版社,2008.
Wang Pujun, Feng Zhiqiang. Volcanic rocks in petroliferous basins [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [7] Petford N, McCaffrey KJ W. Hydrocarbons in crystalline rocks[M]. London: The Geological Society of London, 2003.
- [8] Vernik L. A new type of reservoir rock in volcanicalstic sequences [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(6): 830-836
- [9] Seemann U, Scherer M. Volcaniclastic as potential hydrocarbon reservoirs[J]. Clay Minerals, 1984, 19(9): 457-470.
- [10] 孟元林,焦金鹤,田伟志,等. 松辽盆地北部泉三、四段低渗透储层质量预测[J]. 沉积学报,2011,29(6):36-43.
Meng Yulin, Jiao Jinhe, Tian Weizhi, et al. Low Permeability Reservoir Quality Prediction of the Member 3 and Member 4 of the Quantou Formation in the Northern Songliao Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(6): 36-43.
- [11] 程仲平,孟元林,田伟志,等. 徐家围子断陷登娄库组三段成岩模拟与致密砂岩储层类型预测[J]. 2011, 地学前缘, 18(5): 196-205.
Cheng Zhongping, Meng Yuanlin, Tian Weizhi, et al. Diagenetic Numerical Modeling and Tight Sandstone Reservoir Types Prediction of the Member 3 of the Denglouku Formation of the Xujiaweizi Fault Depression[J]. 2011, Earth Science Frontiers, 18(5): 196-205.
- [12] Byrnes A P. Empirical methods of reservoir quality prediction, In: Wilson W D (ed.). Reservoir quality assessment and prediction in clastic rocks[J]. SEPM Short Course, 1994, 30: 10-21.
- [13] Bloch S, Helmold K P. Approaches to predicting reservoir quality in sandstones[J]. AAPG Bull. 1995, 79(1): 97-115.
- [14] Kupecz J A, Gluyas J, Bloch S. Reservoir quality prediction in sandstones and carbonates: An overview[M]. AAPG Memoir, 1997, 69: vii ~ x x iv.
- [15] 梁浩. 三塘湖盆地芦草沟组页岩油气形成条件及分布规律研究[D]. 中国地质大学(武汉), 2011, 18.
Liang Hao. The research of forming condition & distributing rule of shale oil & gas at Lucaogou Formation in Santanghu Basin[D]. China University of Geosciences(Wuhan), 2011, 18.
- [16] 国建英,钟宁宁,梁浩,等. 三塘湖盆地中二叠统原油的来源及其分布特征[J]. 地球化学,2012,41(3):266-277.
Guo Jianying, Zhong Ningning, Liang Hao, et al. Study on the source and distribution of Middle Permian oils in the Santanghu Basin[J]. Geochimica, 2012, 41(3): 266-277.
- [17] Luo J L, Morad S, Liang Z G, et al. Controls on the quality of Archean

- metamorphic and Jurassic volcanic reservoir rocks from the Xinglongtai buried hill, western depression of Liaohe basin, China[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2005, 89(10): 1319–1346.
- [18] Sruga P, Rubinstein N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquen basins. Argentina[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91: 115–129.
- [19] Feng Z. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: a case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25: 416–432.
- [20] 刘万洙, 黄玉龙, 庞彦明, 等. 松辽盆地营城组中基性火山岩成岩作用: 矿物晶出序列、杏仁体充填和储层效应[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 158–164.
- Liu Wanzhu, Huang Yulong, Pang Yanming, et al. Diagenesis of intermediate and mafic volcanic rocks of Yingcheng Formation in the Songliao basin: Sequential crystallization, amygdale filling and reservoir effect[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 158–164.
- [21] 孟元林. 松辽盆地徐家围子大气田火山岩储层孔隙结构[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 393.
- Meng Yuanlin. Pore structure of volcanic reservoir in Xujiaweizi Large Gas Field, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 393.
- [22] 孟元林, 刘文慧, 孟凡晋, 等. 松辽盆地徐家围子断陷深层异常高孔带分布特征与成因分析[J]. 古地理学报, 2011, 13(1): 75–84.
- Meng Yuanlin, Liu Wenhui, Meng Fanjin, et al. Distribution and origin of anomalously high porosity zones of the Xujiaweizi Fault Depression in Songliao Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(1): 75–84. (in Chinese with English abstract).
- [23] 肖丽华, 施立冬, 王建伟, 等. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩储层质量预测[J]. 地质科学, 2014.
- Xiao Lihua, Shi Lidong, Wang Jianwei, et al. Volcanic reservoir quality prediction of Xujiaweizi Rift Depression, Songliao Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2014.
- [24] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343–350.
- Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in china[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33(3): 343–350.
- [25] 应凤祥, 何东博, 龙玉梅, 等. SY/T 5477—2003. 中华人民共和国石油天然气行业标准并碎屑岩成岩阶段划分[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003. 1–5.
- Ying Fengxiang, He Dongfu, Long Yumei, et al. 2003. SY/T 5477—2003. The division of diagenetic stages in clastic rocks (Petroleum industry criterion in P. R. C.) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press.
- [26] 孟元林, 丁桂霞, 吴河勇, 等. 松辽盆地北部泉三、四段异常高孔隙带预测[J]. 中国石油大学学报, 2011, 35(4): 8–13.
- Meng Yuanlin, Ding Guixia, Wu Heyong, et al. Prediction of anomalously high porosity zones of K1q3 and K1q4 in northern Songliao Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(4): 8–13.
- [27] 肖丽华. 辽河西部凹陷南段古近系异常低压背景下的成岩特征, 第二届非常规油气成藏与勘探评价学术讨论会, 大庆, 2013.
- Xiao Lihua. Diagenetic characters of Palaeogene under abnormal low pressure in Southern Liaohe West Sag, The Second Symposium on Unconventional Petroleum Accumulation and Exploration, 2013, Daqing.
- [28] 孟元林, 胡安文, 乔德武, 等. 松辽盆地徐家围子断陷深层区域成岩规律和成岩作用对致密储层含气性的控制[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 325–334.
- Meng Yuanlin, Hu Anwen, Qiao Dewu, et al. Regional diagenetic law and control of diageneses over the gas-bearing capacity of tight reservoirs of deep in deep Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 325–334.
- [29] 肖丽华, 孟元林, 王建国, 等. 碎屑岩成岩温度的数值模拟和成岩阶段的预测[J]. 中国海上油气(地质), 1995, 9(6): 389–394.
- Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Wang Jianguo, et al. 1995. Modelling of diagenetic temperature and lateral prediction of diagenetic stages for clastic rocks [J]. China offshore oil and gas (geology), 9(6): 389–394.
- [30] 肖丽华, 孟元林, 张连雪, 等. 超压地层中镜质组反射率的计算[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 9–12.
- Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Zhang Lianxue, et al. Vitrinite reflectance modeling in the overpressured formations [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 14–17.
- [31] 孟元林, 黄文彪, 王粤川, 等. 超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型及应用[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 461–467.
- Meng Yuanlin, Huang Wenbiao, Wang Yuechuan, et al. A kinetic model of clay mineral transformation in overpressure setting and its applications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 461–467.
- [32] 孟元林, 许丞, 谢洪玉, 等. 超压背景下自生石英形成的化学动力学模型及应用[J]. 石油勘探与开发, 2013, 44(4): 1472–1478.
- Meng Yuanlin, Xu Cheng, Xie Hongyu, et al. A new kinetic model of authigenic quartz formation under the background of the overpressure and its application [J]. Petroleum Exploration & Development, 2013, 44(4): 1472–1478.
- [33] McKenzie D, Mackenzie A S, Maxwell J R, et al. Isomerization and aromatization of hydrocarbons in stretched sedimentary basins [J]. Nature, 1983, 301: 504–506.
- [34] Meng Y L, Yang J S, Xiao L H, et al. Diagenetic evolution modeling system and its application [C]. // Hao D H, Niu S Y, Liu Y M eds. Treatises of XIII Kerulien international conference of geology. Shijiazhuang, P. R. China: Shijiazhuang University of Economics, 2001, 25–27.
- [35] 东北石油大学(孟元林). 成岩作用数值模拟与优质储层预测系统 V1.0 (编号: 2012SR016322) [P]. 中华人民共和国国家版权局, 2010.
- Northeast Petroleum University (Meng Yuanlin). Diagenetic numerical modeling and high-quality reservoir predicting system V1.0 (No.: 2012SR016322) [P]. The national copyright administration of the People's Republic of China, 2010.

(编辑 董立)