

东部盆地群下白垩统烃源岩特征与页岩气勘探潜力

孟元林¹,申婉琪¹,周新桂²,李世臻²,王丹丹²,张文浩²,曲国辉¹,崔存箫¹

(1. 东北石油大学 地球科学学院,黑龙江 大庆 163318; 2. 中国地质调查局 油气资源调查中心,北京 100029)

摘要:为了研究中国东北地区东部盆地群下白垩统烃源岩的特征与页岩气勘探潜力,对三江盆地、鸡西盆地、通化盆地、柳河盆地和红庙子盆地进行了野外样品采集、烃源岩地球化学与岩矿测试,同时统计了其他盆地烃源岩的地球化学参数。结果表明,东部盆地群下白垩统的烃源岩有机质丰度和类型主要受沉积相的控制,有机质成熟度受莫霍面埋深的影响。下白垩统沉积时研究区北部水体较浅,泥岩累积厚度大、粉砂质剪含量高,有机质丰度达到了差-中的标准,干酪根主要为Ⅱ₂-Ⅲ型,目前处于成熟-高熟阶段。研究区南部水体相对较深,泥岩平均累计厚度为233~446 m,但泥岩质纯,有机质丰度较高,主要发育Ⅰ-Ⅱ₂型干酪根,目前处于低熟-成熟阶段。东部盆地群下白垩统烃源岩脆性矿物含量较高,脆性较大,主要发育粘土矿物间孔缝、粒内孔和有机孔,具有微孔-中孔的孔喉结构,常规油气和页岩气勘探均具有良好的前景。

关键词:莫霍面;有机孔;烃源岩;页岩气;下白垩统;东部盆地群

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Characteristics of the Lower Cretaceous source rocks and shale gas exploration potential of eastern basin group, NE China

Meng Yuanlin¹, Shen Wanqi¹, Zhou Xingui², Li Shizhen², Wang Dandan², Zhang Wenhao², Qu Guohui¹, Cui Cunxiao¹

(1. College of Earth Science, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. Oil and Gas Resources Research Center of China Geological Survey, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to study the characteristics of Lower Cretaceous source rocks and shale gas exploration potential of the eastern basin group in Northeast China, field sampling, geochemical analysis and rock-mineral tests of source rocks were performed and geochemical parameters were measured in the Sanjiang Basin, Jixi Basin, Tonghua Basin, Liuhe Basin and Hongmiaozi Basin. The results indicate that the abundance and type of organic matter in the Lower Cretaceous source rocks are mainly controlled by sedimentary facies, while the maturity of source rocks is influenced by the depth of Moho surface. The Lower Cretaceous source rocks in the north of the study area were deposited in shallow water environment that results in large cumulative thickness of mudstones and higher silt content. These source rocks contain type Ⅱ₂ kerogen and Ⅲ kerogen and are graded as poor-moderate source rocks at mature to over-mature stages. The Lower Cretaceous source rocks in the south of the study area were deposited in deeper water environment that results in thick mudstone deposition (with thickness of 233 m to 446 m) and high organic content. These source rocks mainly contain type Ⅰ-Ⅱ₂ kerogen at low-mature to mature stages. Moreover, the Lower Cretaceous hydrocarbon source rocks are characterized by high content of brittle minerals, important content for development of pores and fractures between clay minerals, intergranular pores as well as organic pores with pore throat structure of micro- and meso- pore. Therefore, there exists favorable exploration prospects for both conventional hydrocarbon and shale gas in Lower Cretaceous of eastern basin group in Northeast China.

Key words: Moho surface, organic pore, source rock, shale gas, Lower Cretaceous, eastern basin group

东部盆地群系指依兰-伊通断裂以东的中小型沉积盆地^[1-2]。在这些盆地中,下白垩统生、储、盖层发育,是一套主要的勘探目的层。在研究区北部的延吉盆地和鸡西盆地的下白垩统中,已发现了工业油气流

和煤成气流,在虎林盆地发现了低产油气流^[3-6]。在研究区南部的下白垩统也取得了突破,通化盆地通D1井在下白垩统亨通山组有62.18m的砂岩中见到良好的油气显示,下桦皮甸子组15.28m厚的页岩裂缝中

收稿日期:2015-10-16;修订日期:2016-04-07。

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

基金项目:国家自然科学基金项目(U1262106,41572135);国家科技重大专项(2016ZX05046-001-006);国土资源部中国地质调查局项目(12120115001701)。

含油,在井口还见到气涌。所有这一切预示着东部盆地群下白垩统具有良好的常规油气和页岩油气含油气远景。但由于这些中小型断陷盆地面积不大,烃源岩主要发育在凹陷的深湖-半深湖区,油气运移距离短,生烃灶控制着油气藏的形成与分布,和我国大多数陆相含油气盆地类似^[7-8],所以烃源岩的研究具有极其重要的意义。然而,目前东部盆地群下白垩统烃源岩的地球化学特征及其整体分布规律不详,严重制约着东部盆地群油气田的勘探。

本文对东部盆地群中的三江、鸡西、通化、柳河和红庙子盆地进行了野外地质调查,采集了 66 块烃源岩样品,完成了有机地球化学和岩矿的相关测试,试图结合前人在东部盆地群下白垩统烃源岩的研究成果,分析烃源岩岩石学和地化特征在横向上的变化及影响因素,探讨页岩气的勘探潜力,为本地区油气田勘探提供科学依据。

1 区域地质概况

东部盆地群包括 38 个主要沉积盆地,总面积约 $5.4 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。盆地基底主要由古生界和前古生界的变质岩组成,部分地区伴有不同期次花岗岩的侵入。沉积盖层为上古生界、中生界和新生界。在北部地区的三江、鸡西和勃利等盆地,下白垩统从下到上依次发育滴道组、城子河组和穆棱组。在南部地区的通化、果松、浑江等盆地,下白垩统从下到上依次发育果松组、鹰嘴砬子组、林子头组和亨通山组^[3-6]。在早白垩世,东北地区气候温暖潮湿,湖泊星罗棋布,形成大量断陷淡水湖盆。已有研究表明^[4-6,9],在下白垩统城子河组沉积时期,研究区北部地区主要发育海陆交互相、扇三角洲、滨浅湖相和半深湖相等沉积体系,沉积水体较浅,形成了煤系泥岩、碳质泥岩以及煤层等烃源岩;南部地区沉积环境以湖泊相为主,只有少数地区发育湖沼相,沉积水体相对较深,主要发育湖相暗色泥岩、油页岩,仅有少数盆地发育薄煤层。整体上,与全球白垩

系烃源岩发育特征相符^[10]。

2 烃源岩岩石学特征

2.1 下白垩统烃源岩厚度和岩性

东部盆地群下白垩统烃源岩累积厚度整体上具有“北厚南薄”的特征。北部地区各盆地地下白垩统烃源岩累积厚度最厚可达 1 285 m,最薄只有几米,厚度变化较大;南部地区各盆地面积较小,下白垩统烃源岩累积厚度分布在 100~850 m,各盆地烃源岩厚度相差较小。在野外石油地质调查过程中发现,研究区南部的烃源岩颜色深、质纯、粉砂含量低,一般发育黑色泥岩、油页岩和薄的煤层;研究区北部的烃源岩颜色较浅、质不纯,粉砂含量较高,多发育暗色泥岩、煤和碳质泥岩,不发育油页岩。

在三江、鸡西、柳河、通化和红庙子等盆地的野外地质调查过程中,采集了烃源岩样品,并完成了地球化学和岩矿测试(表 1)。由表 1 可见,北部地区三江盆地穆棱组和城子河组暗色泥岩中脆性矿物(石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、菱铁矿和黄铁矿)含量分别为 39%和 38%;南部地区柳河盆地亨通山组和通化盆地鹰嘴砬子组的暗色泥岩脆性矿物含量较高,分别为 42%和 48%,烃源岩脆性较大,有利于压裂^[11-12],具有形成页岩气储层的可能性。

2.2 下白垩统泥页岩孔隙类型与有机孔影响因素

氩离子抛光后场发射扫描电镜(FESEM)测试结果表明,东部盆地群下白垩统泥页岩的孔隙类型主要包括粘土矿物间孔缝(图 1a)、有机质和粘土矿物间裂缝(图 1a)、粒内溶孔(图 1b)、有机孔(图 1c,e,f)和有机缝(图 1d)等。有机孔大多数呈圆形(图 1c)、椭圆形和拉长的气泡状(图 1e,f),少数呈长条状裂缝(图 1d),这是有机质生成和排出烃类之后形成的收缩缝。

表 1 东部盆地群下白垩统泥岩 XRD 分析结果
Table 1 XRD analysis results of the Lower Cretaceous mudstones in the eastern basin group

盆地	层位	岩性	矿物含量/%								
			粘土	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	脆性矿物
三江	穆棱组(K_1m)	泥岩	60	21	2	6	3	4	1	2	39
	城子河组(K_1ch)	泥岩	$\frac{56 \sim 60}{58.00(2)}$	$\frac{22 \sim 28}{25.00(2)}$	$\frac{1 \sim 2}{1.50(2)}$	$\frac{6 \sim 6}{6.00(2)}$	$\frac{1 \sim 1}{1.00(2)}$	$\frac{1 \sim 1}{1.00(2)}$	$\frac{1 \sim 1}{1.00(2)}$	$\frac{2 \sim 3}{2.50(2)}$	$\frac{35 \sim 41}{38.00(2)}$
柳河	亨通山组(K_1h)	泥岩	$\frac{40 \sim 46}{42.50(4)}$	$\frac{8 \sim 15}{11.00(4)}$	$\frac{2 \sim 3}{2.50(4)}$	$\frac{13 \sim 18}{15.25(4)}$	$\frac{2 \sim 4}{2.75(4)}$	$\frac{4 \sim 7}{5.50(4)}$	$\frac{1 \sim 3}{1.75(4)}$	$\frac{2 \sim 4}{3.25(4)}$	$\frac{38 \sim 47}{42.00(4)}$
通化	鹰嘴砬子组(K_1y)	泥岩	$\frac{42 \sim 60}{50.00(3)}$	$\frac{29 \sim 42}{34.67(3)}$	$\frac{1 \sim 3}{1.67(3)}$	$\frac{3 \sim 9}{5.67(3)}$	$\frac{1 \sim 3}{1.67(3)}$	$\frac{1 \sim 4}{1.67(3)}$	$\frac{1 \sim 2}{1.67(3)}$	$\frac{1 \sim 1}{1.00(3)}$	$\frac{39 \sim 53}{48.00(3)}$

注:表格内数据分子为范围值,分母为平均值,括号内数字为统计样品数。

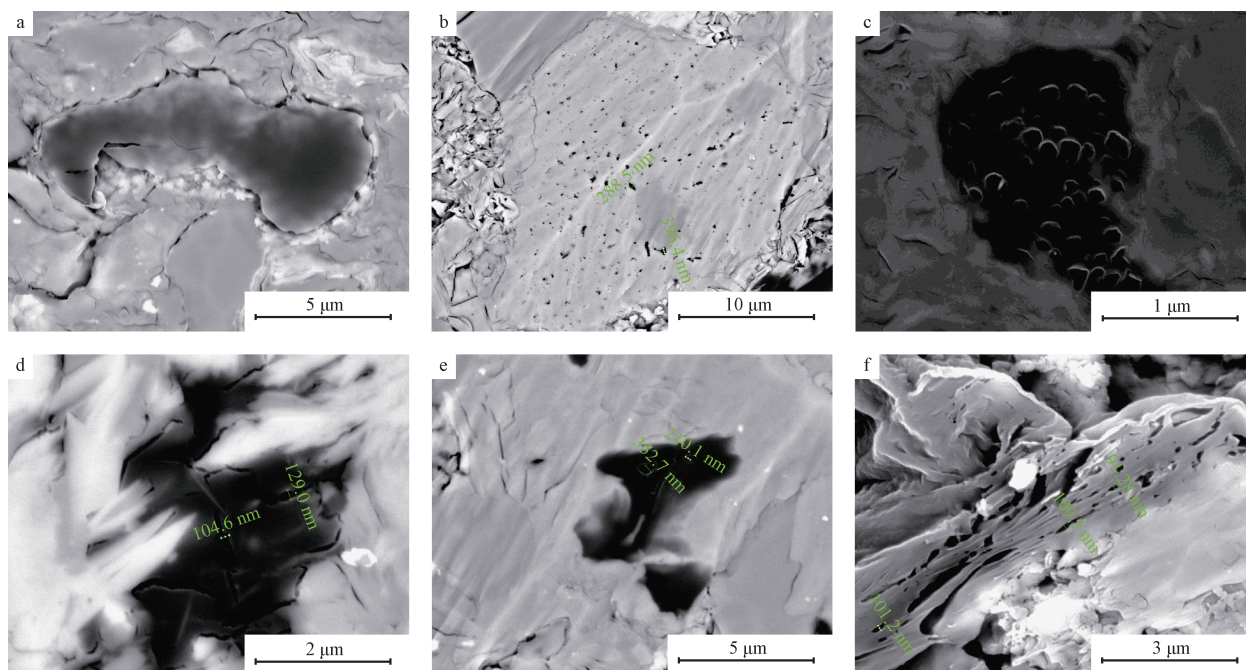


图1 东部盆地群下白垩统泥页岩孔隙显微照片

Fig. 1 Pores microphotos of the Lower Cretaceous shales in the eastern basin group

a. 红庙子盆地, 鹰嘴砬子组 (K_1y), 泥岩, II 型干酪根, $R_o = 0.75\%$, 粘土矿物间裂缝、粘土矿物与有机质之间裂缝; b. 鸡西盆地, 城子河组 (K_1ch), 泥岩, 长石内溶蚀孔隙; c. 三江盆地, 滨页 1 井, 埋深 602 m, 城子河组 (K_1ch), 页岩, II 型干酪根, $R_o = 0.84\%$, 有机质孔发育; d. 通化盆地, 通 D1 井, 埋深 276.9 m, 亨通山组 (K_1h), 泥岩, II 型干酪根, $R_o = 1.1\%$, 有机质内裂缝发育; e. 鸡西盆地, 城子河组 (K_1ch), 泥岩, II 型干酪根, $R_o = 1.56\%$, 有机质孔发育; f. 通化盆地, 通 D1 井, 埋深 206.3 m, 亨通山组 (K_1h), 泥岩, II 型干酪根, $R_o = 2.0\%$, 有机质孔发育

有机孔的发育受多种地质因素的影响与控制, 最主要的影响因素是有机质成熟度。当有机质成熟度较低时, 泥岩中仅发育有机质与粘土矿物之间的孔缝(图 1a), 随烃源岩有机质热演化程度的增高, 干酪根生成和排出油气, 形成有机孔、缝(图 1c—f)。但不同学者有关有机孔开始出现的时间研究结果不同, 有机孔开始形成的 R_o 值对应于 $0.6\% \sim 0.9\%$ [13]。造成这种差异的原因, 是不同地区烃源岩的排烃门限不同。有机孔之所以形成是由于烃源岩发生了排烃, 而排烃门限对应的 R_o 值又受控于有机质丰度和类型。一般来说 [14], 有机质丰度越高、类型越好, 生成的油气越多, 进入排烃门限的时间越早, 形成有机孔对应的有机质成熟度就越低。随有机质成熟度的增加, 油气的生成和排出持续进行, 有机孔发育程度变好(图 1a, c—f)。但当有机质成熟度达到某个临界值时, 有机孔开始减少, 并逐步消失。不同学者的研究结果有所不同, 王飞宇(2013)认为这一临界 R_o 值为 2.0% [15], 而 Curtis(2012)认为是 3.6% [16]。实际上, 当 R_o 为 4.0% 时, 碎屑岩就开始变质, 进入浅变质阶段 [17], 烃源岩有机孔就不可避免地要减少。由此可以推测, 有机孔开始减小的临界值应该是 R_o 值为 4.0% 左右。

2.3 下白垩统泥页岩孔喉结构

三江盆地滨页 1 井 (By1-n-35)、通化盆地通 D1 井 (TD1-164, TD1-130) 和鸡西盆地 (JxD2m2-1) 泥页岩液氮吸附法的分析结果表明(图 2; 表 2), 东部盆地群下白垩统泥页岩孔径较小, 以微孔 ($<2\text{ nm}$)—中孔 ($2 \sim 50\text{ nm}$) 为主, 平均孔径分别为 $7.18, 7.91, 8.63, 8.49\text{ nm}$ 。最可几孔径是指最可能几率孔径, 取决于孔径分布形态, 如果是正态分布, 就是平均孔径。下白垩统烃源岩的最可几孔径 $\leq 2\text{ nm}$, 页岩气主要呈吸附态存在于泥页岩中。泥岩的孔隙度分布在 $1\% \sim 5\%$ (表 2)。

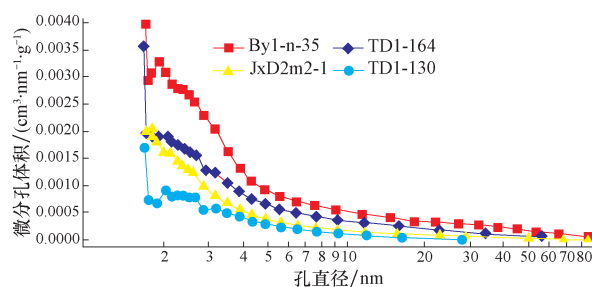


图2 东部盆地群下白垩统泥页岩孔径分布

Fig. 2 Pore size distribution of the Lower Cretaceous shales in the eastern basin group

表 2 东部盆地群下白垩统烃源岩暗色泥岩孔隙结构参数
Table 2 Pore structure parameters of the Lower Cretaceous dark mudstone in the eastern basin group

样品参数	By1 - n - 35	TD1 - 164	TD1 - 130	JxD2m2 - 1
BET 比表面/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	14. 596 4	6. 475 2	2. 223 9	8. 011 4
BJH 总孔容/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	0. 026 2	0. 012 8	0. 004 8	0. 017 0
孔隙度/%	5. 24	2. 32	0. 96	3. 40
BJH 平均孔直径/ nm	7. 18	7. 91	8. 63	8. 49
BJH(吸附)最可 几孔直径/nm	1. 88	1. 72	2. 00	1. 80
R_o /%	0. 84	0. 96	0. 99	1. 56

3 烃源岩地球化学特征

3.1 下白垩统烃源岩有机质丰度特征及影响因素

3.1.1 下白垩统烃源岩有机质丰度

本文的实测数据表明,三江盆地发育煤系暗色泥岩和碳质泥岩两大类烃源岩。依据陈建平提出的我国煤系泥岩有机质丰度评价标准^[18],穆棱组和城子河组烃源岩的有机质丰度较低(表 3),碳质泥岩为很差的烃源岩,暗色泥岩仅达到了差烃源岩的丰度标准。

鸡西盆地城子河组发育了煤、碳质泥岩和煤系泥岩 3 种烃源岩。烃源岩有机质丰度较低,煤和碳质泥岩属于非烃源岩,暗色泥岩为差的烃源岩。

柳河、通化和红庙子盆地仅发育湖相暗色泥岩,有机质丰度较高,参照陆相烃源岩有机质评价标准^[19],无论是柳河盆地亨通山组的暗色泥岩,还是通化盆地和红庙子盆地鹰嘴砬子组的暗色泥岩,都达到了中等烃源岩的丰度标准。

以上实测数据表明,位于研究区北部的三江盆地和鸡西盆地烃源岩生烃能力较差,而位于研究区南部的柳河、通化和红庙子盆地烃源岩生烃潜力中等。由此可见,研究区南部烃源岩的有机质丰度明显比北部好。

3.1.2 下白垩统烃源岩有机质丰度平面变化规律及影响因素

为了更深入地研究下白垩统烃源岩有机质丰度在横向上的变化规律,在实测数据的基础上,搜集了前人大量的分析化验资料(包括以前的实测资料)^[3-6,20-47],完成了东部盆地群下白垩统烃源岩综合评价图(图 3)。由图 3 可见,研究区烃源岩的有机质丰度具有“南高北低”的特征。有机质丰度的这种变化特征与当时的沉积环境密切相关。在研究区南部,下白垩统主要发育淡水湖泊及少量沼泽相沉积,形成了暗色湖相泥岩以及油页岩,有机碳含量较高,烃源岩生烃潜

表 3 实测东部盆地群下白垩统烃源岩有机质丰度
Table 3 Measured organic matter abundance of the Lower Cretaceous source rocks in the eastern basin group

盆地	地层	烃源岩	TOC /%	$(S_1 + S_2)/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	氯仿沥青“A”含量/%	综合评价
三江	穆棱组 (K_1m)	炭质泥岩	6. 9	11. 36	—	很差
		暗色泥岩	0. 81 ~ 1. 42 1. 11(4)	0. 25 ~ 1. 42 0. 82(4)	—	差
	城子河组 (K_1ch)	炭质泥岩	9. 55	11. 88	—	很差
		暗色泥岩	1. 26 ~ 1. 32 1. 30(3)	0. 44 ~ 0. 71 0. 55(3)	—	差
鸡西	城子河组 (K_1ch)	煤	26. 85 ~ 81. 63 56. 46(6)	18. 91 ~ 158. 46 73. 10(7)	—	非
		炭质泥岩	7. 12	3. 96	—	非
		暗色泥岩	1. 78 ~ 4. 81 3. 30(2)	0. 96 ~ 2. 25 1. 60(2)	—	差
柳河	亨通山组 (K_1h)	暗色泥岩	0. 25 ~ 5. 162 2. 88(19)	0. 01 ~ 5. 02 2. 58(7)	0. 000 96 ~ 0. 051 3 0. 03(7)	中等
通化	鹰嘴砬子组 (K_1y)	暗色泥岩	0. 06 ~ 2. 14 0. 97(20)	0. 05 ~ 5. 32 2. 07(17)	0. 004 9 ~ 0. 086 0. 04(8)	中等
红庙子	鹰嘴砬子组 (K_1y)	暗色泥岩	1. 04(1)	0. 76(1)	0. 04(1)	中等

注:表格内数据分子为范围值,分母为平均值,括号内数字为统计样品数。

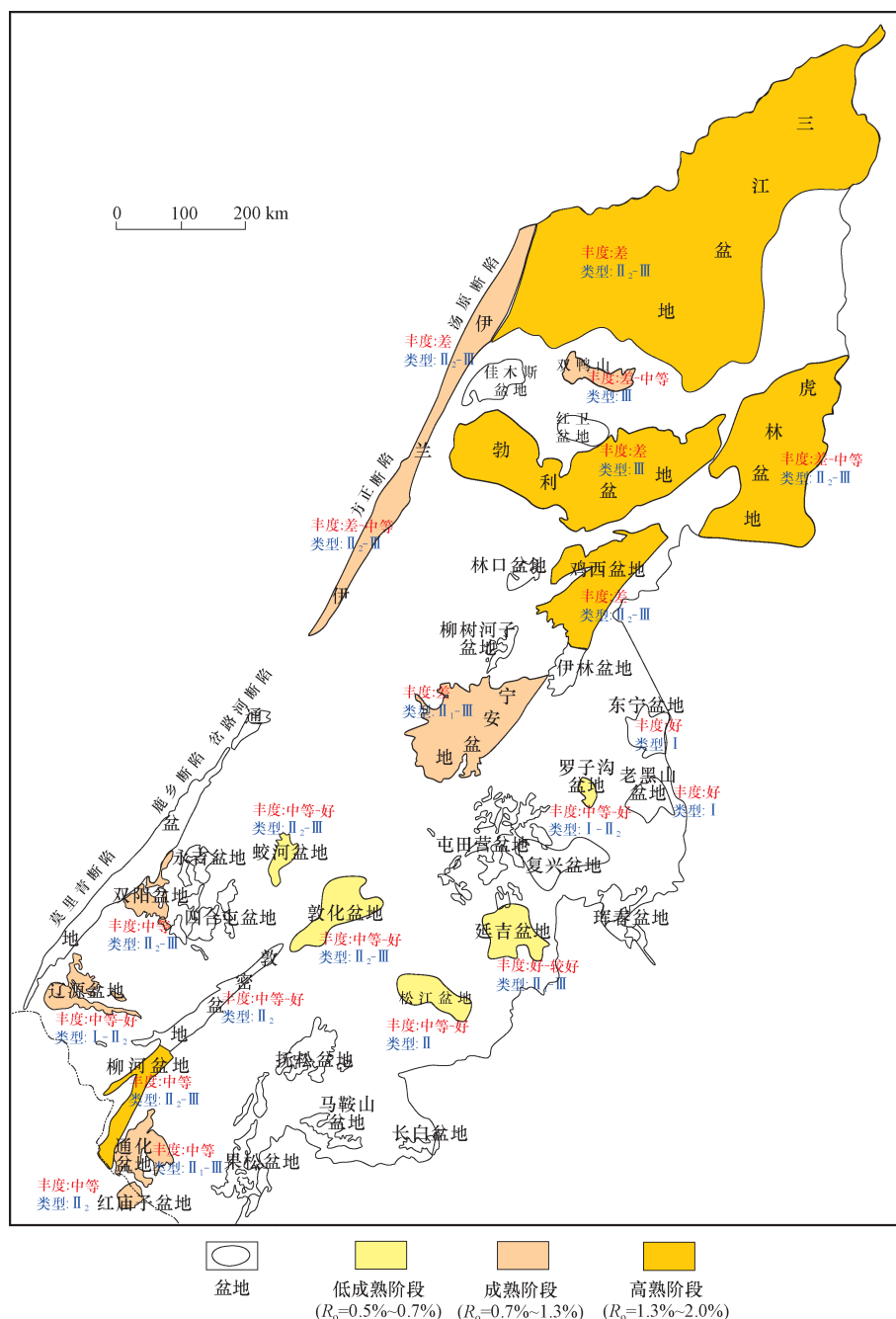


图3 东部盆地群下白垩统烃源岩综合评价

Fig. 3 Comprehensive assessment chart of the Lower Cretaceous source rocks in the eastern basin group

力较大,达到了中等偏好的烃源岩丰度标准;而在研究区北部,沉积环境多样,但沉积水体较浅,主要发育海陆交互相、扇三角洲相和滨浅湖相,烃源岩有机碳含量较高,但生烃潜力不大,属于差-中等丰度的烃源岩。

3.2 下白垩统烃源岩有机质类型及影响因素

3.2.1 下白垩统烃源岩有机质类型

三江盆地下白垩统穆棱组和城子河组干酪根类型主要为Ⅲ型,少数为Ⅱ₂型(图4)。鸡西盆地下白垩统城子河组烃源岩有机质类型主要为Ⅱ型和Ⅲ型(图4)。热解资料显示,柳河盆地下白垩统亨通山组烃源

岩和红庙子盆地下白垩统鹰嘴砬子组烃源岩有机质类型均为Ⅲ型。但柳河盆地烃源岩干酪根的显微组分主要为腐殖无定形体和镜质组为主(图5a,b),红庙子盆地烃源岩干酪根的显微组分以腐殖无定形体、镜质组和腐泥无定形体为主(图5c),有机质来源既有陆源高等植物,又有水生生物。造成这种矛盾的原因可能是柳河和红庙子盆地下白垩统烃源岩风化严重,使烃源岩中的碳、氢元素流失,氧元素增加,有机质类型变差(图4),但风化作用没有改变干酪根显微组分的形态。在我国西宁等盆地和国外也存在类似情况^[48]。由此可见,柳河盆地和红庙子盆地下白垩统烃源岩的干酪根类型应分别为Ⅱ₂-Ⅲ型和Ⅱ₂型(图5a—c)。

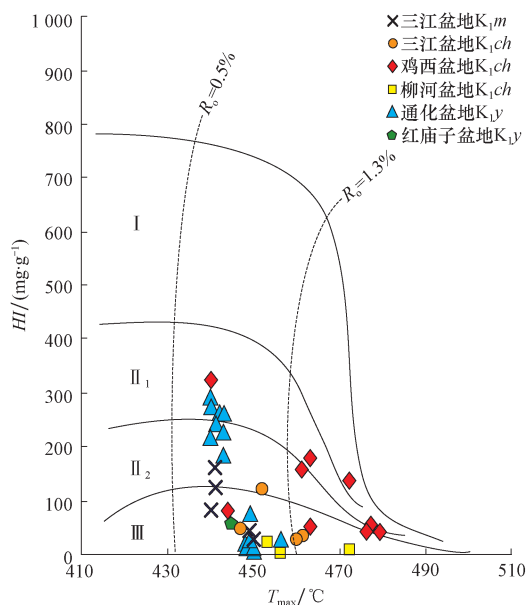


图4 东部盆地群下白垩统烃源岩有机质类型

Fig. 4 Organic matter types of the Lower Cretaceous source rocks in the eastern basin group

K_1m . 下白垩统穆棱组; K_1ch . 下白垩统城子河组;

K_1y . 下白垩统鹰嘴砬子组

通化盆地下白垩统鹰嘴砬子组烃源岩有机质类型主要为 II_1 型、 II_2 型和 III 型(图4),干酪根的显微组分中,既有腐殖和腐泥无定形体(图5d),又有镜质组、丝质

体和角质体(图5e,f),有机质来源于水生生物和陆源高等植物。

3.2.2 下白垩统烃源岩有机质类型平面变化规律及影响因素

研究区下白垩统烃源岩主要发育 II - III 型干酪根(图3),南部地区的有机质类型好于北部地区。北部地区下白垩统烃源岩有机质类型主要为 II_2 - III 型,南部地区下白垩统烃源岩的优势有机质类型为 I - II_2 型。其原因在于,北部地区沉积盆地发育于海陆交互相和滨浅湖相等浅水环境,有机质来源于陆生高等植物及水生浮游生物,但以陆生生物为主;南部地区沉积环境主要为湖相,少数沼泽相,油页岩较发育,水生浮游生物繁盛,在少数湖沼相烃源岩中陆源高等生物较为发育。因此,北部烃源岩具有一定的生气潜力,南部烃源岩同时具有生油和生气的潜力。三江、鸡西、柳河、通化和红庙子盆地的实测数据也支持了这一观点(图4,图5)。

3.3 下白垩统烃源岩有机质成熟度及影响因素

3.3.1 东部盆地群下白垩统烃源岩有机质成熟度

烃源岩热解和镜质组反射率的测试结果表明,三

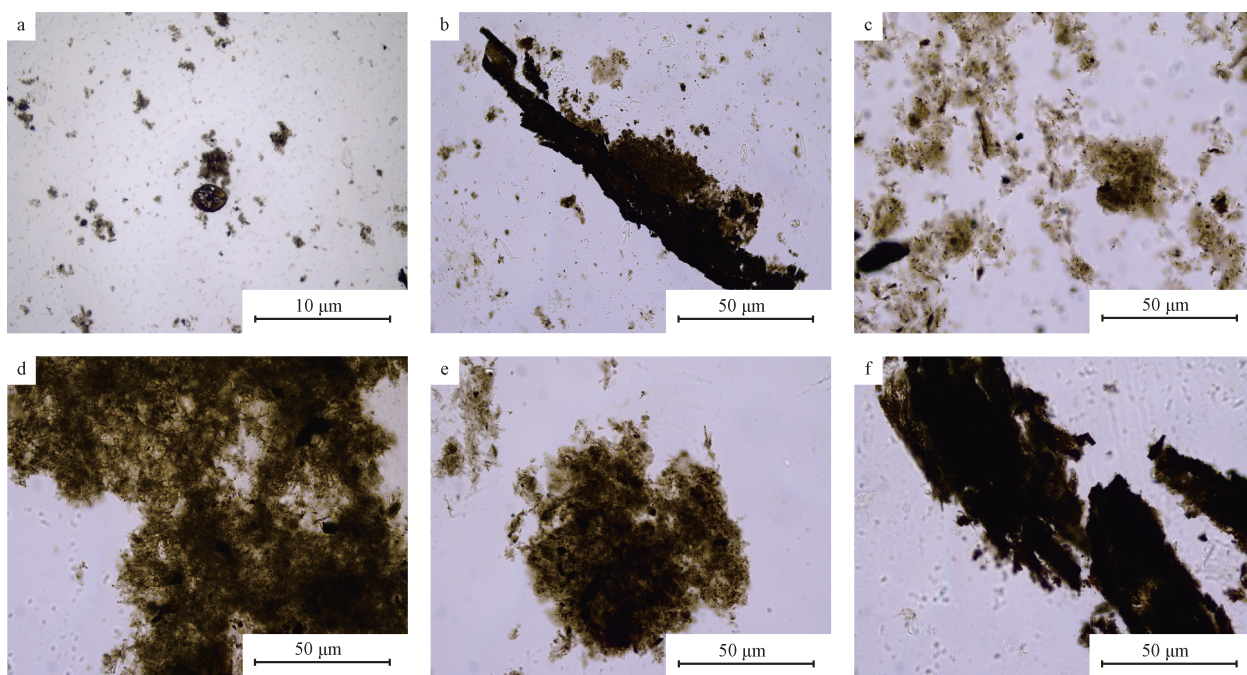


图5 柳河盆地、通化盆地和红庙子盆地下白垩统烃源岩有机质显微组分

Fig. 5 Organic macerals of the Lower Cretaceous source rocks in the Liuhe Basin, Tonghua Basin and Hongmiaozhi Basin

a. 有机质以镜质组和腐殖无定形体为主,见少量丝质体,III型,柳河盆地,亨通山组(K_1h),暗色泥岩;b. 有机质以腐殖无定形体为主,见镜质组, II_2 型,柳河盆地,亨通山组(K_1h),暗色泥岩;c. 有机质以腐殖无定形体和镜质组为主,可见腐泥无定形体, II_2 型,红庙子盆地,鹰嘴砬子组(K_1y),暗色泥岩;d. 有机质以腐殖和腐泥无定形体为主,可见镜质组, II_1 型,通化盆地,鹰嘴砬子组(K_1y),暗色泥岩;e. 有机质以腐殖无定形体为主,见镜质组和少量丝质体, II_2 型,通化盆地,鹰嘴砬子组(K_1y),暗色泥岩;f. 有机质以镜质组为主,见腐殖无定形体和少量角质体,III型,通化盆地,鹰嘴砬子组(K_1y),暗色泥岩

江、鸡西、柳河、通化和红庙子盆地下白垩统烃源岩有机质成熟度较高,目前处于成熟-高成熟热演化阶段,有利于油气的大量生成。 R_o 值主要分布在0.7%~1.3%和1.3%~2.0%(图6), T_{max} 值主要分布在440~450℃和450~480℃两个区间(图7)。

3.3.2 下白垩统烃源岩有机质成熟度平面变化规律及影响因素

东部盆地群下白垩统烃源岩有机质成熟度具有“北高南低”的变化趋势(图3),有机质热演化程度从北到南逐渐降低。研究区北部下白垩统烃源岩主要处于成熟-高成熟阶段,研究区南部烃源岩主要处于低熟-成熟阶段,少数盆地(如柳河盆地)由于受周围火山岩的影响,成熟度偏高,达到高成熟阶段。

导致东部盆地群下白垩统烃源岩有机质成熟度分布差异的主要原因与该地区莫霍面的埋深有关。莫霍面埋藏越浅,大地热流越高,地温梯度越高,同一时代烃源岩的 R_o 值越高,生油门限越浅(图8)。由图8可见,三江、虎林、勃利和鸡西盆地位于研究区北部,莫霍面埋

较浅,生油门限较浅;而罗子沟、延吉和敦化盆地位于研究区南部,莫霍面埋藏较深,生油门限也相对较深。

4 下白垩统页岩气存在可能性

东部盆地群下白垩统暗色泥岩的有机质丰度较高,目前处于低成熟-高成熟阶段,干酪根类型以Ⅱ-Ⅲ型为主,除了生成液态烃外,还具有较强的生气能力。全球范围的进一步统计结果表明^[49-50],已发现页岩气田烃源岩的 R_o 主要分布在0.4%~1.8%, TOC 在1.0%~24.0%(图9)。东部盆地群下白垩统烃源岩的 TOC 和 R_o 值大部分都落在了这一范围。由此可以推测,东部盆地群下白垩统的烃源岩具有生成页岩气的潜力。

5 结论

1) 东部盆地群下白垩统烃源岩厚度具有“北厚南薄”的特征,但研究区南部烃源岩颜色深、质纯、粉砂含

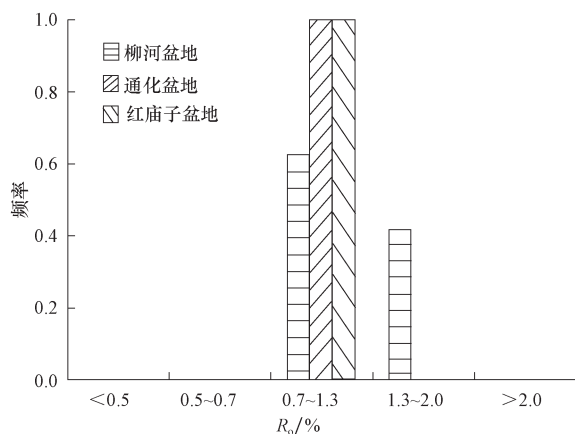


图6 柳河、通化和红庙子盆地下白垩统烃源岩镜质组反射率频率分布

Fig. 6 Vitrinite reflectances frequency distribution of the Lower Cretaceous source rocks in the Liuhe Basin, Tonghua Basin and Hongmiaozi Basin

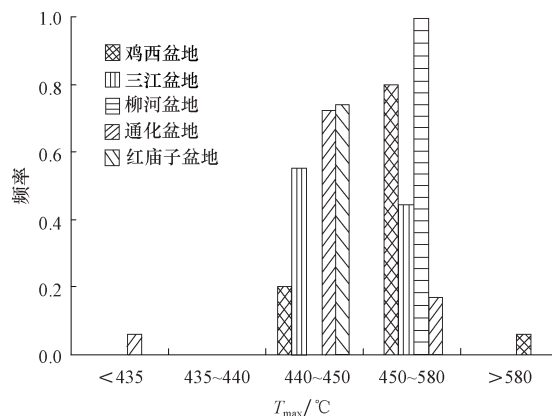


图7 三江、鸡西、柳河、通化和红庙子盆地下白垩统烃源岩热解峰温频率分布

Fig. 7 T_{max} frequency distribution of the Lower Cretaceous source rocks in the Sanjiang Basin, Jixi Basin, Liuhe Basin, Tonghua Basin and Hongmiaozi Basin

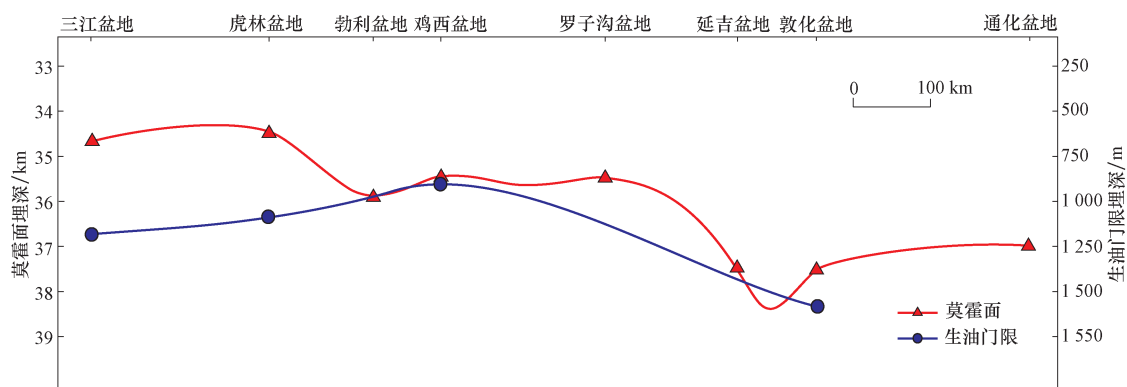


图8 东部盆地群莫霍面埋深、生油门限深度

Fig. 8 Moho depth and petroleum-generative threshold depth in the Eastern Basin Group

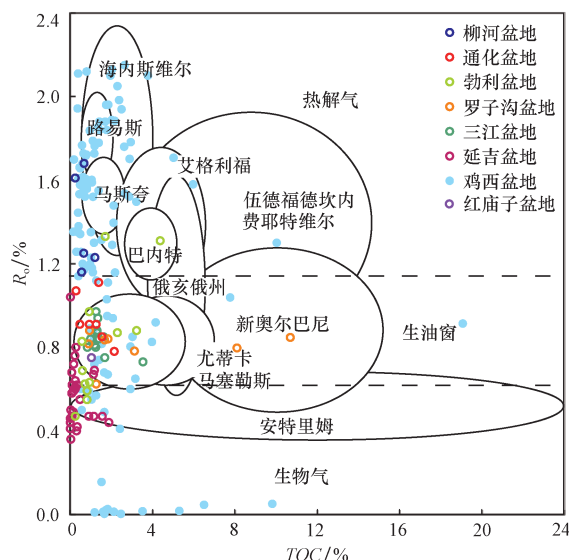


图9 东部盆地群下白垩统烃源岩地化特征与其他页岩油气田对比

Fig. 9 Comparison of the Lower Cretaceous source rock geochemical characteristics in the Eastern Basin Group of Northeast China with those in other shale oil and gas fields around world

量较低,一般发育暗色泥岩、油页岩和薄的煤层;北部烃源岩颜色较浅、粉砂含量较高,多发育暗色泥岩、煤和碳质泥岩。

2) 下白垩统泥页岩的脆性矿物含量在38%~48%,脆性较大,孔喉直径主要为微孔-中孔,最可几孔为微孔,天然气在泥页岩中主要以吸附态的形式存在。干酪根有机孔主要受有机质成熟度的影响,其次为有机质类型。随有机质成熟度的增加,有机孔发育程度变好。干酪根类型越好,有机质孔越发育。

3) 东部盆地群下白垩统沉积时期,从北到南水体变深,有机质丰度升高,有机质类型变好。研究区北部下白垩统烃源岩达到了差-中的有机质丰度标准,有机质类型主要为Ⅱ₂-Ⅲ型;南部烃源岩达到了中-好的有机质丰度标准,发育I-Ⅱ₂型干酪根。

4) 东部盆地群下白垩统烃源岩有机质成熟度具有“北高南低”的分布特征,研究区北部烃源岩达到了成熟-高成熟的演化阶段,南部烃源岩达到了低熟-成熟的演化阶段。有机质成熟度的主要影响因素是莫霍面埋深,北部莫霍面埋藏浅,地温梯度高,生油门限浅;南部莫霍面埋藏深,地温梯度低,生油门限深。

5) 东部盆地群下白垩统泥页岩的地化特征和储层性能良好,无论是常规油气,还是页岩气勘探均具有良好的勘探远景。

参考文献

[1] 乔德武,任收麦,邱海峻,等. 中国油气资源勘探现状与战略选区[J]. 地质通报,2011,30(2~3):187-196.

Qiao Dewu, Ren Shoumai, Qiu Haijun, et al. The present situation of

oil & gas resources exploration and strategic selection of potential area in China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 28(2/3): 187-196.

[2] 张抗. 东北地区油气领域接替形势展望(代序)[J]. 地质通报, 2013, 32(8): 1141-1146.

Zhang Kang. The prospect of the development of oil and gas exploration in Northeast China (in lieu of preface) [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(8): 1141-1146.

[3] 张吉光,金成志,金银姬. 延吉残留断陷盆地油气地质特点及勘探潜力[M]. 北京:科学出版社,2014:1-34.

Zhang Jiguang, Jin Chengzhi, Jin Yinyi. Petroleum geological characteristics and exploration potential of Yanji residual fault Basin [M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-34.

[4] 国土资源部油气资源战略研究中心. 东北地区油气资源动态评价[M]. 北京:石油工业出版社,2013:127-180.

Strategic research center of oil & gas resources, Ministry of Land and Resources. Dynamic evaluation of oil and gas resources in northeast China [M]. Beijing: Petroleum industry press, 2013: 127-180.

[5] 国土资源部油气资源战略研究中心. 东北中-新生代盆地油气资源战略调查与选区[M]. 北京:地质出版社,2013:1-58.

Strategic research center of oil & gas resources, Ministry of Land and Resources. Oil and gas resources strategic investigation and selection of Mesozoic and Cenozoic Basin in northeast China [M]. Beijing: Geological publishing house, 2013: 1-58.

[6] 孟元林,肖丽华,曲国辉,等. 松辽盆地东部外围断陷盆地群油气地质条件研究成果[R]. 大庆:东北石油大学,2015:32-144.

Meng Yuanlin, Xiao Lihua, Qu Guohui, et al. Oil and gas geological condition research results of peripheral fault basin group to eastern Songliao Basin [R]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015: 32-144.

[7] 胡朝元. “源控论”适用范围量化分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 1-7.

Hu Chaoyuan. Research on the appliance extent of “source control theory” by semi quantitative statistics characteristics of oil and gas migration distance [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10): 1-7.

[8] 赵文智,邹才能,汪泽成,等. 富油气凹陷“满凹含油”论——内涵与意义[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 5-13.

Zhao Zhiwen, Zou Caineng, Wang Zecheng, et al. Exploration of subtle reservoir in prolific depression of Bohai bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 5-13.

[9] 陈延哲. 吉林东南部大鸭绿江盆地中生代岩相古地理特征[D]. 成都:成都理工大学, 2012.

Cheng Yanzhe. Characteristics of Mesozoic lithofacies palaeogeography of big Yalu Jiang Basin in southeast Jilin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.

[10] 杨静懿,李江海,马利亚. 全球白垩系烃源岩分布及沉积环境[J]. 古地理学报, 2014, 16(3): 401-410.

Yang Jingyi, Li Jianghai, Ma Liya. Global distribution and sedimentary environment of the Cretaceous source rocks [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(3): 401-410.

[11] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Work Basin: issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.

[12] 邹才能. 非常规油气地质[M]. 第二版, 北京:地质出版社, 2013: 93-125.

Zou Caineng. Unconventional petroleum geology [M]. Beijing: Geo-

- logical publishing house, 2013: 93 – 125.
- [13] 罗小平, 吴飘, 赵建红, 等. 富有机质泥页岩有机质孔隙研究进展[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(1): 50 – 59.
Luo Xiaoping, Wu Piao, Zhao Jianhong, et al. Study advances on organic pores in organic matter-rich mud shale[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(1): 50 – 59.
- [14] 庞雄奇. 排烃门限控油气理论及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 88 – 105.
Pang Xiongqi. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological publishing house, 1995: 88 – 105.
- [15] 王飞宇, 关晶, 冯伟平, 等. 过成熟海相页岩孔隙度演化特征和游离气量[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 764 – 768.
Wang Feiyu, Guan Jing, Feng Weiping, et al. Evolution of overmature marine shale porosity and implication to the free gas volume[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 764 – 768.
- [16] Curtis M E, Cardott B J, Sondergeld C H, et al. Development of organic in the Woodford Shale with increasing thermal maturity[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 103(3): 26 – 31.
- [17] 应凤祥, 何东博, 龙玉梅, 等. 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(SY/T5477 ~ 2003) [S]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1 – 11.
Ying Fengxiang, He Dongbo, Long Yumei, et al. Oil and gas industry standard of the People's Republic of China: Division of clastic diagenetic stage[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1 – 11.
- [18] 陈建平, 赵长毅, 何忠华. 煤系有机质生烃潜力评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(1): 1 – 5.
Chen Jianping, Zhao Changyi, He Zhonghua. Criteria for evaluating the hydrocarbon generating potential for organic in coal measures[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(1): 1 – 5.
- [19] 黄飞, 辛茂安. 中华人民共和国石油天然气行业标准并陆相烃源岩地球化学评价方法(SY/T5735 ~ 1995) [S]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 1 – 19.
Huang Fei and Xin Maoan. Oil and gas industry standard of the People's Republic of China: The geochemical evaluation method of continental-facies source rocks[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 1 – 19.
- [20] Yu M D, Wang P J, Wang R X, et al. Source rock characteristics and oil-gas resource potential in Dunhua Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(5): 67 – 70.
- [21] 刘维亮, 夏斌, 蔡周荣, 等. 鸡西盆地白垩统天然气地质条件[J]. 天然气工业, 2010, 30(2): 40 – 44.
Liu Weiliang, Xia Bin, Cai Zhouong, et al. The Lower Cretaceous gas geological conditions in Jixi Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(2): 40 – 44.
- [22] 董清水, 聂辉, 陶高强, 等. 吉林省松江盆地白垩统烃源岩地球化学特征及油气勘探前景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(1): 52 – 59.
Dong Qingshui, Nie Hui, Tao Gaoqiang, et al. Geochemistry characteristics and hydrocarbon exploration perspective of Lower Cretaceous source rock in the Songliao Basin, Jilin province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(1): 52 – 59.
- [23] 孙哲, 郝国丽, 陈贵标, 等. 蛟河盆地白垩系石油地质特征及有力勘探区块预测[J]. 世界地质, 2013, 32(1): 84 – 91.
Sun Zhe, Hao Guoli, Chen Guiping, et al. Cretaceous petroleum geological characteristics and prediction of favorable exploration targets in Jiaohe Basin[J]. Global Geology, 2013, 32(1): 84 – 91.
- [24] 刘蕾蕾, 郝国丽, 王忠辉, 等. 罗子沟盆地白垩系大砬子组烃源岩特征及评价[J]. 世界地质, 2013, 32(1): 92 – 97.
Liu Leilei, Hao Guoli, Wang Zhonghui, et al. Characteristics of hydrocarbon source rock and evaluation of Cretaceous dalazi Formation in Luo Zigou Basin[J]. Global Geology, 2013, 32(1): 92 – 97.
- [25] 陈贵标, 郝国丽, 田春燕, 等. 平岗 – 辽源盆地白垩纪演化及有利勘探区块预测[J]. 世界地质, 2013, 32(1): 105 – 113.
Chen Guibiao, Hao Guoli, Tian Chunyan, et al. Evolution of Pinggang-Liaoyuan Basin in Cretaceous and prediction of favourable exploration areas[J]. Global Geology, 2013, 32(1): 105 – 113.
- [26] 侯仔明, 刘明慧, 袁桂林, 等. 双鸭山盆地白垩统煤系烃源岩初步评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 31(2): 201 – 204.
Hou Zaiming, Liu Minghui, Yuan Guilin, et al. The preliminary evaluation of the Lower Cretaceous coal measures hydrocarbon source rocks of Shuang Yashan Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(2): 201 – 204.
- [27] 韩欣澎, 郝国丽, 刘超, 等. 通化盆地石油地质特征及油气资源潜力[J]. 世界地质, 2013, 32(2): 337 – 343.
Han Xinpeng, Hao Guoli, Liu Chao, et al. Petroleum geological features and petroleum resources potential in Tonghua Basin[J]. Global Geology, 2013, 32(2): 337 – 343.
- [28] 林长城, 郝国丽, 陈桂标, 等. 敦 – 密断裂带吉林段断陷盆地石油地质条件及勘探方向[J]. 世界地质, 2013, 32(2): 317 – 324.
Lin Changcheng, Hao Guoli, Chen Guibiao, et al. Petroleum geology and exploration orientation in faulted Basins along the Dunhua-Mishan fault in Jilin province[J]. Global Geology, 2013, 32(2): 317 – 324.
- [29] 刘招君, 杨虎林, 董清水, 等. 中国油页岩[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 38 – 123.
Liu Zhaojun, Yang Hulin, Dong Qingshui, et al. Oil shales in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 38 – 123.
- [30] 丁正言, 王元生, 张启龙, 等. 吉林油田石油地质志(卷2): 大庆、吉林油田(下册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 505 – 508.
Ding Zhengyan, Wang Yuansheng, Zhang Qilong, et al. Petroleum geology of Jinlin oilfield (Vol. 2): Daqing & Jilin oilfield (Vol. 2) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 505 – 508.
- [31] 孟元林, 肖丽华, 李泰明, 等. 盆地模拟在油气勘探初期阶段的应用[J]. 天然气工业, 1994, 14(4): 6 – 9.
Meng Yuanlin, Xiao Lihua, Li Taiming, et al. Application of Basin simulation to exploring oil and gas at initial stage[J]. Natural Gas Industry, 1994, 14(4): 6 – 9.
- [32] 孟元林, 李泰明, 肖丽华, 等. 汤原断陷煤成油初步研究[J]. 大庆石油学院学报, 1991, 9(1): 51 – 54.
Meng Yuanlin, Li Taiming, Xiao Lihua, et al. Primary study of coal formed oil in Tangyuan faulted Basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1991, 9(1): 51 – 54.
- [33] 曲延林, 马立军, 孙德忠. 黑龙江省油页岩资源分布及勘探开发布局[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(10): 19 – 21.
Qu Yanlin, Ma Lijun, Sun Dezhong, et al. Oil shale resources distribution and exploration arrangements in Heilongjiang province[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(10): 19 – 21.
- [34] 韩春花. 勃利盆地中生界地质特征及油气资源潜力分析[D]. 吉

- 林:吉林大学,2005.
- Han Chunhua. Analysis of Mesozoic geological characteristics and hydrocarbon resource potential of Boil Basin[D]. Jilin:Jilin University, 2005.
- [35] Hou Z M, Deng H W, Liu M H. Preliminary Source Rock Evaluation of Lower-Cretaceous Coal-Measures Strata in Hulin Basin in North-eastern China[J]. Advanced Materials Research, 2014, 968(3): 194-197.
- [36] 张渝金. 虎林盆地七虎林河坳陷油气地质条件分析[D]. 吉林:吉林大学. 2010.
- Zhang Yujin. Analysis of petroleum geological conditions in the Qihulin River depression of Hulin Basin[D]. Jilin:Jilin University, 2010.
- [37] 周荔青, 刘池阳. 中国东北油气区晚侏罗世-早白垩世断陷油气成藏特征[J]. 中国石油勘探, 2004, 20(2): 20-25.
- Zhou Liqing, Liu Chiyang. Oil and gas migration and accumulation characteristics of Late Jurassic-Early Cretaceous rifts in northeast China oil and gas area[J]. China Petroleum Exploration, 2004, 9(2): 20-25.
- [38] 姜贵周, 陈章明, 陈秉麟, 等. 依-舒地堑构造格局及其对石油地质条件的控制[R]. 大庆:大庆石油学院, 1986: 89-103.
- Jiang Guizhou, Chen Zhangming, Chen Binglin, et al. The tectonic framework of Yilan-Shulan graben and its controls to the petroleum geological conditions[R]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 1986: 89-103.
- [39] 陈章明, 姜贵周, 黎文清, 等. 敦-密断裂带北段与两侧盆地构造过程及其对石油地质条件的控制[R], 大庆:大庆石油学院, 1989: 82-102.
- Chen Zhangming, Jiang Guizhou, Li Wenqing, et al. Structural process of the northern Dunhua-Mishan fault belt and the Basins on both sides of the fault and its controls to the petroleum geological conditions[R]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 1989: 82-102.
- [40] 李泰明, 孟元林, 肖丽华, 等. 汤原断陷盆地模拟研究[R]. 大庆:大庆石油学院, 1991: 18-24.
- Li Taiming, Meng Yuanlin, Xiao Lihua, et al. Basin modeling of Tangyuan faulted Basin[R]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 1991: 18-24.
- [41] 迟元林, 侯启军, 蒙启安, 等. 松辽盆地北部深层石油地质综合研究与目标评价[R]. 大庆:大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 1999: 148-169.
- Chi Yunalin, Hou Qijun, Meng Qian, et al. Comprehensive researches and objective evaluations of petroleum geology of deep horizon in northern Songliao Basin[R]. Daqing: Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company, 1999: 148-169.
- [42] 关德师, 迟元林, 陈章明, 等. 东北地区深层石油地质综合研究[R]. 北京:中国石油勘探开发研究院, 2000: 102-116.
- Guan Deshi, Chi Yuanlin, Chen Zhangming, et al. Comprehensive studies of petroleum geology of deep horizon in northeast China[R]. Beijing: China Petroleum Exploration and Development Research Institute, 2000: 102-116.
- [43] 李忠权, 罗启后, 吴征, 等. 大庆探区外围盆地含油气性评价与优选[R]. 大庆:大庆油田勘探开发研究院, 2003: 97-503.
- Li Zhongquan, Luo Qihou, Wu Zheng, et al. Hydrocarbon potential assessment and basin favorable selection in the peripheral Basins of Daqing exploration area[R]. Daqing: Exploration and Development Research Institute of Daqing oilfield, 2003: 97-503.
- [44] 李景坤, 宋兰斌, 刘伟, 等. 松辽盆地北部深层天然气及外围盆地油气资源评价[R]. 大庆:大庆油田有限责任公司, 2005: 29-70.
- Li Jingkun, Song Lanbin, Liu Wei, et al. Resource evaluations of deep natural gas in northern Songliao Basin and oil and gas in its peripheral Basins[R]. Daqing: Daqing Oilfield limited Company, 2005: 29-70.
- [45] 冯志强, 何勇, 杨建国, 等. 东北中、新生代断陷盆地群油气资源战略调查及评价[R]. 大庆:大庆油田有限责任公司, 2007: 199-207.
- Feng Zhiqiang, He Yong, Yang Jianguo, et al. Oil and gas resource strategic investigation and evaluation of Mesozoic and Cenozoic faulted basin group in northeast China[R]. Daqing: Daqing Oilfield limited Company, 2007: 199-207.
- [46] 吴河勇, 李子顺, 王世辉, 等. 大庆外围盆地优选区油气资源战略评价及突破研究[R]. 大庆:大庆油田有限责任公司, 2010: 84-103.
- Wu Heyong, Li Zishun, Wang Shihui, et al. Oil and gas resource strategic evaluation and breakthrough research of favorable selection of Daqing peripheral Basins[R]. Daqing: Daqing Oilfield limited Company, 2010: 84-103.
- [47] 卢双舫, 胡慧婷, 王伟明, 等. 大庆外围盆地致密砂岩气和煤层气成藏条件类比研究[R]. 大庆:大庆石油学院, 2011: 42-49.
- Lu Shuangfang, Hu Huiting, Wang Weiming, et al. Analogical research on reservoir forming conditions of tight sandstone gas and coalbed methane in Daqing peripheral Basins[R]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2011: 42-49.
- [48] 孟元林, 肖丽华, 杨俊生, 等. 风化作用对西宁盆地野外露头有机质性质的影响及校正[J]. 地球化学, 1999, 28(1): 42-50.
- Meng Yuanlin, Xiao Lihua, Yang Junsheng, et al. Influences of weathering on organic matter of outcrop and correcting methods in Xining Basin[J]. Geochemical, 1999, 28(1): 42-50.
- [49] Bustin R M, Bustin A, Ross D J, et al. Shale gas opportunities and challenges[J]. AAPG Annual Convention, 2008, 91(4): 20-23.
- [50] 王伟峰, 刘鹏, 陈晨, 等. 页岩气成藏理论及资源评价方法[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3): 429-438.
- Wang Weifeng, Liu Peng, Chen Chen, et al. The study of shale gas reservoir theory and resources evaluation[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3): 429-438.

(编辑 张玉银)