



松辽盆地西部斜坡区上二叠统林西组生烃潜力评价 ——来自吉白地 2 井的证据

孙 雷,陈树旺,张 健,苏 飞,卞雄飞,张海华

中国地质调查局 沈阳地质调查中心,辽宁 沈阳 110034

摘 要: 对松辽盆地西部斜坡区中部吉白地 2 井上二叠统林西组的烃源岩发育特征及有机地球化学特征进行了系统研究。结果表明,该区上二叠统林西组暗色泥岩、板岩发育,单层最大厚度为 29 m,累计厚度达 138.42 m。有机碳含量为 0.01%~2.10%,平均为 0.62%,整体为中等烃源岩范畴,有机质丰度较高。应用于干酪根碳同位素、干酪根元素法综合分析,判断其有机质类型以 II 型干酪根为主,部分为 III 型干酪根。镜质组反射率与伊利石结晶度分析表明烃源岩热演化达到高成熟—过成熟阶段,整体处于成岩作用阶段。综合评价认为该区上二叠统林西组具备一定的生烃潜力,且以生气为主,具有一定的页岩气资源前景。

关键词: 生烃潜力;烃源岩;上二叠统;林西组;松辽盆地

EVALUATION ON THE HYDROCARBON GENERATION POTENTIAL OF UPPER PERMIAN LINXI FORMATION IN WESTERN SLOPE OF SONGLIAO BASIN: Evidence from JBD-2 Well

SUN Lei, CHEN Shu-wang, ZHANG Jian, SU Fei, BIAN Xiong-fei, ZHANG Hai-hua

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The paper studies the development and organic geochemical characteristics of source rocks from Upper Permian Linxi Formation in JBD-2 well in central western slope of Songliao Basin. The results show that dark mudstone and slate are developed with the maximum thickness of 29 m for single layer and cumulative thickness of 138.42 m. With high organic abundance, TOC of 0.01%–2.10% (averagely 0.62%), the formation generally belongs to medium grade source rock. Applying the carbon isotope and element composition of kerogen for comprehensive analysis, it is inferred that the organic type is II-type kerogen dominated, with III-type kerogen partly. The analyses of vitrinite reflectance (R_o) and illite crystallinity indicate the thermal evolution of source rocks reaches the high mature-over mature stage, and the whole is in the diagenesis stage. It is concluded from comprehensive evaluation that the Upper Permian Linxi Formation has certain hydrocarbon generation potential, mainly gas, and certain prospect for shale gas resource.

Key words: hydrocarbon generation potential; source rock; Upper Permian; Linxi Formation; Songliao Basin

收稿日期:2020-12-15;修回日期:2021-04-13. 编辑:张哲.

基金项目:国家重点研发计划项目“松辽盆地深层早白垩世新层系古环境与古气候及油气资源潜力评价”(2019YFC06054);中国地质调查局项目“松辽盆地北部及外围石炭—二叠系油气地质调查”(DD20190097),“松辽外围西部盆地油气基础地质调查”(DD20160163);“中国矿产地志”(DD20190379).

作者简介:孙雷(1988—),男,硕士,工程师,从事油气基础地质调查研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号,E-mail//281270393@qq.com

通信作者:陈树旺(1964—),男,博士,研究员,从事油气基础地质调查研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号,E-mail//syncswgeology@163.com

0 引言

松辽盆地是中国东部大型的中生代陆相含油气盆地,盆地基底由石炭系—二叠系沉积岩、极低变质岩及不同时期的侵入岩体组成.随着近几年深层天然气勘探的深入,在盆地内的二叠系中发现了油气显示,并在花岗岩风化壳和二叠系浅变质岩中获得工业气流,揭示了石炭系—二叠系是值得关注的勘探领域^[1-2].为了

进一步加强松辽盆地西部斜坡区深部石炭系—二叠系油气勘探,中国地质调查局沈阳地质调查中心在松辽盆地西部斜坡区中部白城—丰收镇地区部署了一系列重磁电震工程,发现在火山岩高阻之下存在明显的低阻层,推测其为石炭系—二叠系(图 1),其顶面最大埋深约为 6 000 m,一般为 3 000 m 左右,其中西南部埋深相对较浅,为 1 800~2 200 m^[3].据此在松辽盆地西

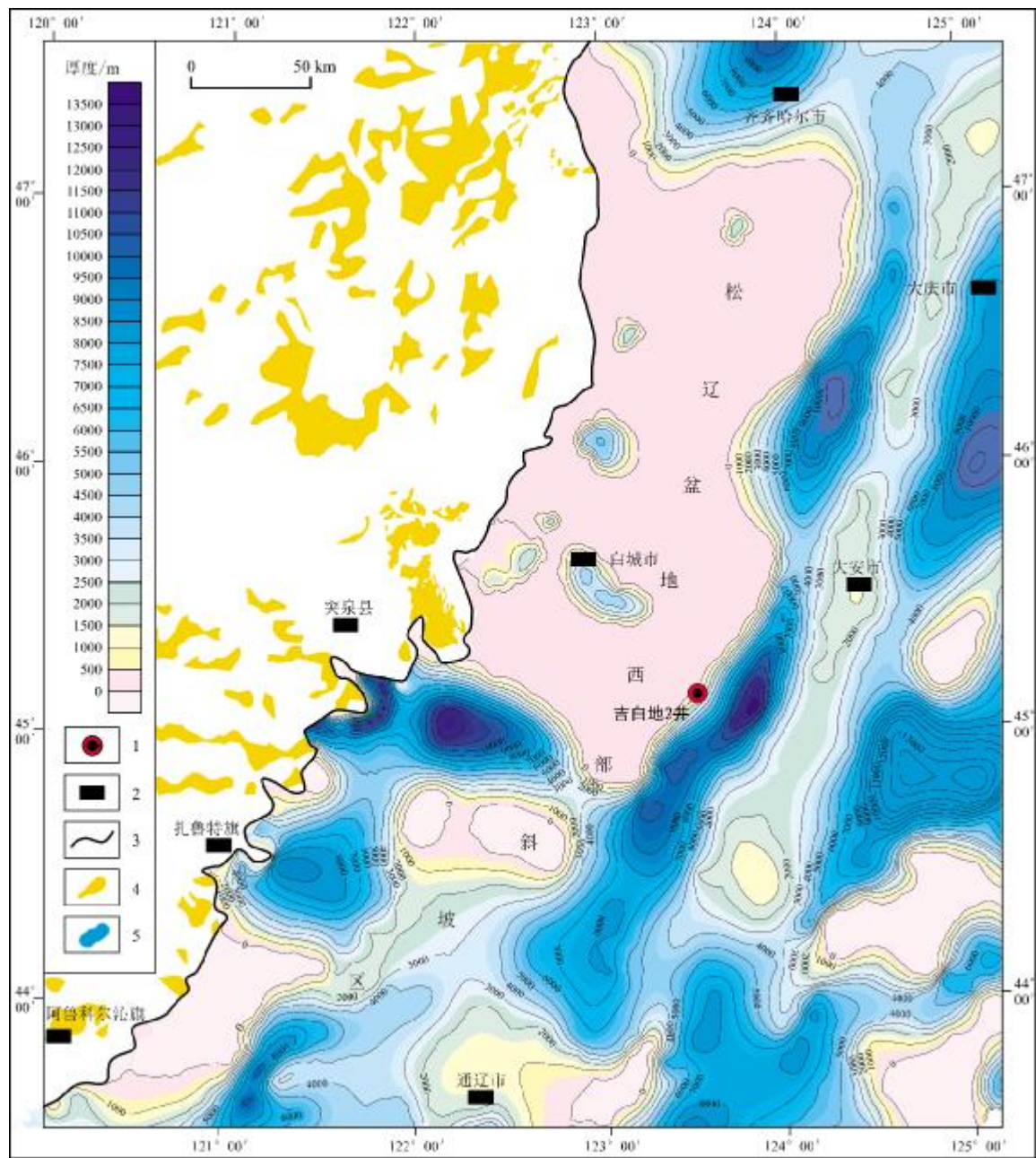


图 1 松辽盆地西部斜坡区上古生界物探预测图

Fig. 1 Prediction map of Upper Paleozoic distribution in western slope of Songliao Basin by geophysical prospecting
1—地质调查井(geological survey well); 2—城镇(town); 3—松辽盆地边界(boundary of Songliao Basin); 4—松辽盆地外围上古生界(Upper Paleozoic in the periphery of Songliao Basin); 5—松辽盆地预测上古生界(prediction of Upper Paleozoic in Songliao Basin)

部斜坡区中部部署实施了吉白地2井,并首次在该区广泛发育的厚层火山岩之下钻遇二叠系暗色泥页岩。为此,本文对吉白地2井暗色泥岩岩心样品进行系统的测试分析,以期查明该地区石炭系—二叠系的生烃潜力,为研究区深层油气勘探提供科学依据。

1 地质概况

松辽盆地西部斜坡区位于吉林省西部的白城一带,其西侧与大兴安岭隆起带东部毗邻,北部、南部、东部分别与松辽盆地的北部倾没区、西南隆起区、中央凹陷区相邻。区内石炭系—二叠系岩性以黑色泥板岩、变余砂岩和结晶灰岩为主,夹有不同时期的花岗岩侵入体以及少量变质砂岩、蚀变安山岩、千枚岩等^[1-2]。

吉白地2井位于松辽盆地西部斜坡中部吉林省大安市龙沼镇境内(图1),完钻井深2 284.4 m。依据钻孔岩石组合与邻区钻孔、露头剖面对比^[4-7],通过井震对比以及侵入体锆石U-Pb年龄综合分析,将吉白地2井所钻遇地层自上而下划分为:第四系(Q, 0~45 m),上新统泰康组(N_2t , 45~135 m),中新统大安组(N_3d , 135~215 m),上白垩统明水组(K_2m , 215~504 m)、四方台组(K_2s , 504~604 m)、嫩江组(K_2n , 604~814 m)、姚家组(K_2y , 814~930 m)、青山口组(K_2qn , 930~1 118 m),下白垩统泉头组(K_1q , 1 118~1 496 m)、营城组(K_1y , 1 496~1 872 m),上二叠统林西组(P_3l , 1 872~2 284.4 m)。

上二叠统林西组岩性主要为灰黑色泥岩、板岩及少量的灰色粉砂岩、泥质粉砂岩(图2),其内发育浅灰

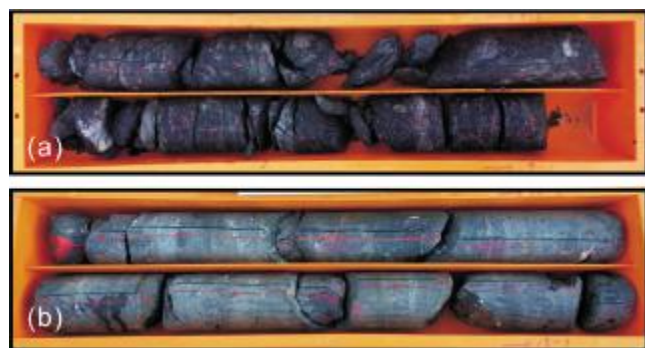


图2 吉白地2井中林西组暗色泥岩

Fig. 2 Dark mudstones of Linxi Formation from JBD-2 well
a—黑色碳质泥岩, 1895.45~1897.18 m (black carbonaceous mudstone at the well interval of 1895.45~1897.18 m); b—灰黑色板岩, 1952.48~1954.45 m (grayish black slate at the well interval of 1952.48~1954.45 m)

色石英二长斑岩、红褐色细粒二长岩、灰白色花岗斑岩、浅肉红色中细粒二长花岗岩、细粒斑状花岗闪长岩等侵入体。

该井共钻遇林西组(未钻穿)17层暗色泥板岩,单层厚度大于3 m的泥板岩共计12层,最大单层厚度为29 m,累计厚度达138.42 m。本研究在吉白地2井上二叠统林西组1 872~2 252 m的井段内采集了19件暗色泥板岩样品,进行全面的有机地球化学分析,综合评价其生烃潜力。

2 有机地球化学特征

2.1 有机质丰度

本区有机质热演化程度较高,大部分可溶有机质已经裂解,并经历过大量生烃和排烃过程,其氯仿沥青“A”和生烃潜量 S_1+S_2 数值很低,已经不能真实地反映有机质丰度,不适用于本区演化程度较高的上二叠统林西组烃源岩评价^[8-10],因此采用有机碳(TOC)对林西组烃源岩有机质丰度进行评价^[11]。根据陆相烃源岩地球化学评价方法^[12], $TOC>2.0\%$ 的为极好烃源岩, $1.0\%<TOC\leq 2.0\%$ 为好烃源岩, $0.6\%<TOC\leq 1.0\%$ 为中等烃源岩, $0.4\%\leq TOC\leq 0.6\%$ 为差烃源岩, $TOC<0.4\%$ 为非烃源岩。

吉白地2井林西组暗色泥岩、板岩TOC为0.01%~2.10%,平均为0.62%(表1)。其中,中等烃源岩占26.32%,好烃源岩占10.53%,极好烃源岩占10.53%(图3);暗色泥板岩 $TOC>1.0\%$ 的好烃源岩共计2层,厚度分别19和16.26 m,共计35.26 m(表2)。整体属于中等烃源岩的范畴,具有一定的生烃物质基础。

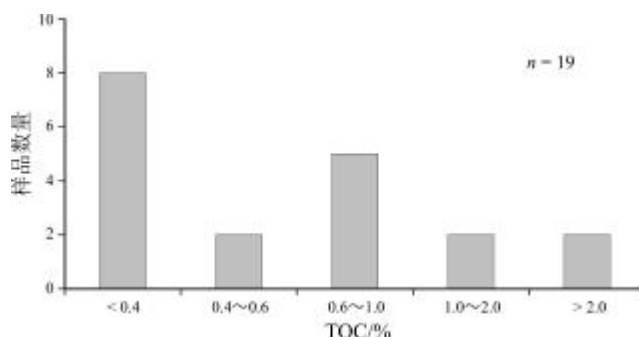


图3 吉白地2井林西组烃源岩TOC分布图

Fig. 3 TOC distribution of Linxi Formation source rocks in JBD-2 well

吉白地2井林西组有机碳在纵向上有明显的变化

表 1 松辽盆地西部斜坡区吉白地 2 井林西组烃源岩地球化学测试分析数据表
Table 1 Geochemical analysis data of Linxi Formation source rocks in JBD-2 well

深度/m	岩性	总有机碳 TOC /%	氯仿沥青“A” /%	生烃潜量(S ₁ +S ₂) /10 ⁻³	HI/10 ⁻³	最高峰温 T _{max} /℃	H/C	O/C	干酪根碳同位素 δ ¹³ C/‰	R _o /%
1879.65	黑色炭质泥岩	2.1	0.021894	0.32	19	434	/	/	-23.714	2.73
1881.85	黑色炭质泥岩	2.05	0.019483	0.14	7	447	0.13	0.01	-23.662	/
1896.88	黑色炭质泥岩	1.69	0.012338	0.04	2	442	0.13	0.02	-22.881	1.39
1897.95	黑色炭质泥岩	0.897	0.008147	0.12	6	300	0.43	0.08	-23.325	/
1917.7	灰黑色泥岩	0.0165	0.005303	0.07	13	436	/	/	-23.439	/
1919.91	灰黑色泥岩	0.0148	0.004545	0.16	31	326	/	/	-26.237	/
1921	灰黑色泥岩	0.041	0.005576	0.06	8	546	/	/	-28.632	3.14
1922	灰黑色泥岩	0.0104	0.004717	0.03	5	525	/	/	-26.038	/
1923	灰黑色泥岩	0.746	0.054696	0.15	12	433	0.44	0.12	-26.239	/
1924.04	灰黑色泥岩	1.1	0.007393	0.03	2	370	0.88	0.04	-26.006	3.63
1925.29	灰黑色泥岩	0.492	0.004762	0.12	10	351	0.58	0.09	-26.843	/
1926	灰黑色泥岩	0.802	0.003232	0.03	1	390	0.99	0.08	-26.465	3.02
1927	灰黑色泥岩	0.842	0.00547	0.06	3	440	0.79	0.14	-24.859	/
1928.2	灰黑色泥岩	0.861	0.002925	0.03	2	350	0.49	0.09	-24.631	3.35
1992.7	灰黑色板岩	0.0106	0.004215	0.09	7	408	/	/	-25.221	/
1993.7	灰黑色板岩	0.0251	0.003203	0.06	10	543	/	/	-25.257	2.87
1994.8	灰黑色板岩	0.0199	0.004915	0.06	8	450	1.02	0.12	-26.094	3.29
1995.5	灰黑色板岩	0.0118	0.007427	0.01	3	409	/	/	-27.914	2.27
1996.6	灰黑色板岩	0.0228	0.009011	0.02	2	373	1.27	0.21	-26.631	4.13

分析测试单位:长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室.

趋势,向上远离侵入岩体的烃源岩 TOC 含量逐渐升高(图 4). 有机质丰度越高,说明烃源岩受岩浆热液活动对其有机质丰度产生一定的负相关作用影响.

表 2 吉白地 2 井林西组烃源岩 TOC>1.0%厚度统计表
Table 2 Thickness data of Linxi Formation source rocks with TOC>1.0% in JBD-2 well

层数	岩性	顶深/m	底深/m	厚度/m	TOC/%
1	黑色炭质泥岩	1879	1898	19	$\frac{1.69-2.10^*}{1.95}$
2	灰黑色泥岩	1913	1929.26	16.26	1.10

* 横线上为测试值范围,横线下为平均值; n=3.

2.2 有机质类型

评价有机质类型有多种方法,本研究利用干酪根碳同位素、元素组成特征综合评价林西组烃源岩有机

质类型.

2.2.1 干酪根碳同位素

影响干酪根碳同位素组成的主要因素是干酪根的类型,由此将干酪根碳同位素组成作为划分陆相烃源岩干酪根类型的重要指标. 腐泥型干酪根相对富集轻碳同位素 ¹²C, 腐殖型干酪根相对富集重碳同位素 ¹³C. 由于较轻的干酪根碳同位素组成一般反映较高的水生生物贡献和较多的类脂化合物含量,表明其具有较好的有机质类型. 通常情况下,干酪根 δ¹³C<-28‰为Ⅰ型有机质类型,δ¹³C>-25.5‰为Ⅲ型有机质类型,-28‰≤δ¹³C≤-25.5‰为Ⅱ型有机质类型^[11-13].

从吉白地 2 井上二叠统林西组烃源岩碳同位素分布图(图 5)来看,其有机质类型中Ⅰ—Ⅲ型干酪根均有,但Ⅰ型较少. 由于 δ¹³C 受热演化程度影响较大,通常会有 2‰~6‰的变重^[14]. 此外该区林西组烃源岩属

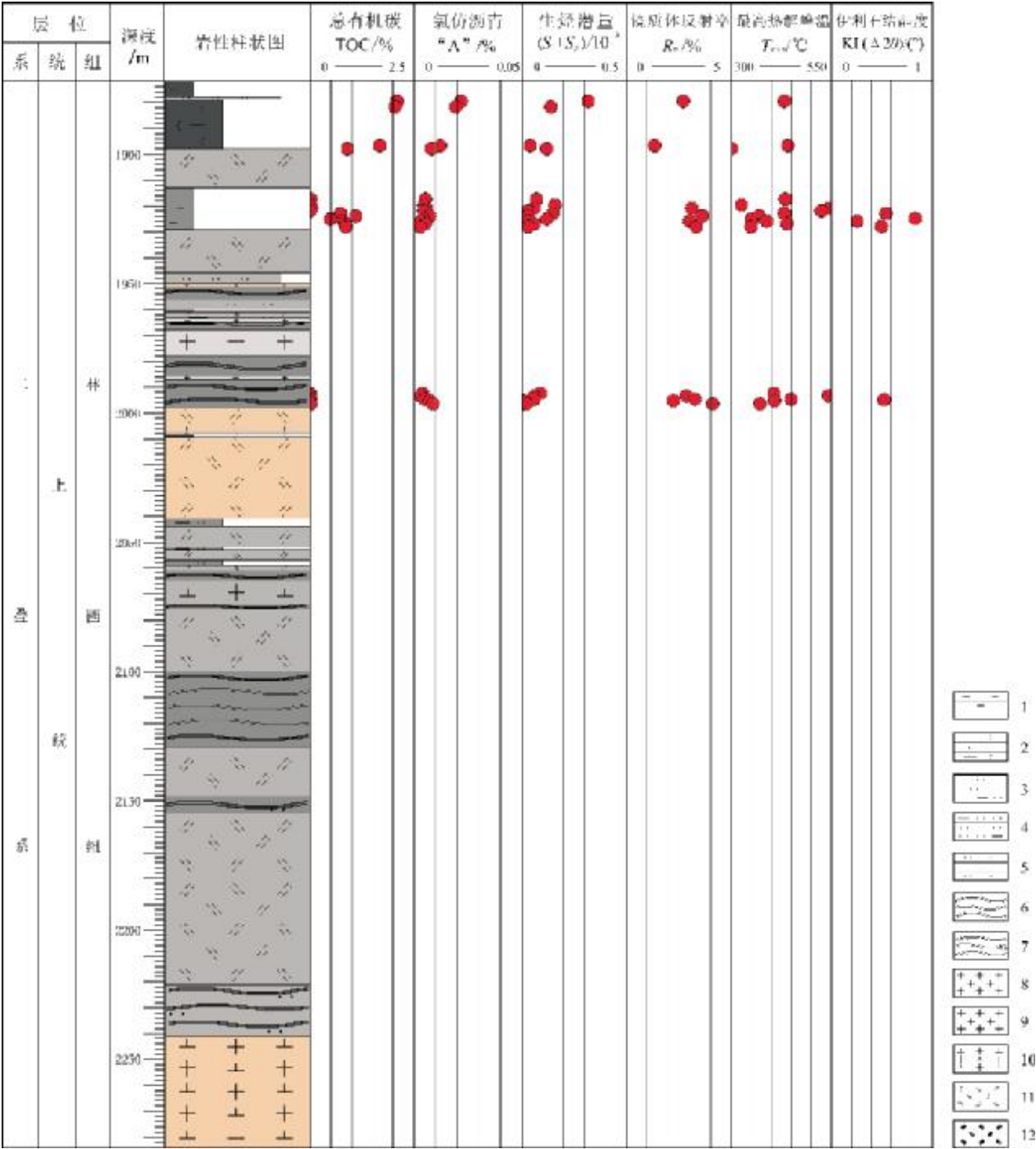


图 4 松辽盆地西部斜坡区吉白地 2 井林西组烃源岩综合评价柱状图

Fig. 4 Comprehensive column of Linxi Formation source rocks in JBD-2 well

1—泥岩 (mudstone); 2—碳质泥岩 (carbonaceous mudstone); 3—粉砂质泥岩 (silty mudstone); 4—泥质粉砂岩 (argillaceous siltstone); 5—粉砂岩 (siltstone); 6—板岩 (slate); 7—粉砂质板岩 (silty slate); 8—花岗岩 (granite); 9—花岗斑岩 (granite porphyry); 10—花岗闪长岩 (granodiorite); 11—二长岩 (monzonite); 12—二长斑岩 (monzoporphyry)

于热演化程度较高的烃源岩^[15],因此所取得的 $\delta^{13}\text{C}$ 的数值会有一定程度的变重,所以恢复后的吉白地 2 井林西组烃源岩有机质类型应以 II 型干酪根为主,并有一部分 III 型干酪根.

2.2.2 干酪根元素法

干酪根元素法(范式图)确定干酪根的类型,是蒂索等^[16]利用类型和成熟度不同的干酪根在范式图上有不同分布位置提出的.从吉白地 2 井林西组烃源岩

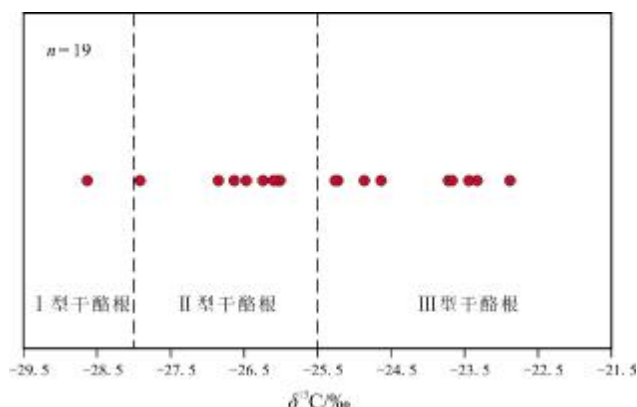


图5 吉白地2井林西组烃源岩干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值与有机质类型关系图

Fig. 5 Relation between $\delta^{13}\text{C}$ values of kerogen and organic matter types of Linxi Formation source rocks in JBD-2 well

干酪根元素法(范式图)判别图(图6)来看,其烃源岩有机质类型为Ⅱ、Ⅲ型干酪根.由于高演化的烃源岩随着H、O的消耗,会逐渐向高碳化特征演化,利用H/C和O/C变化判断原始有机质类型变得困难.

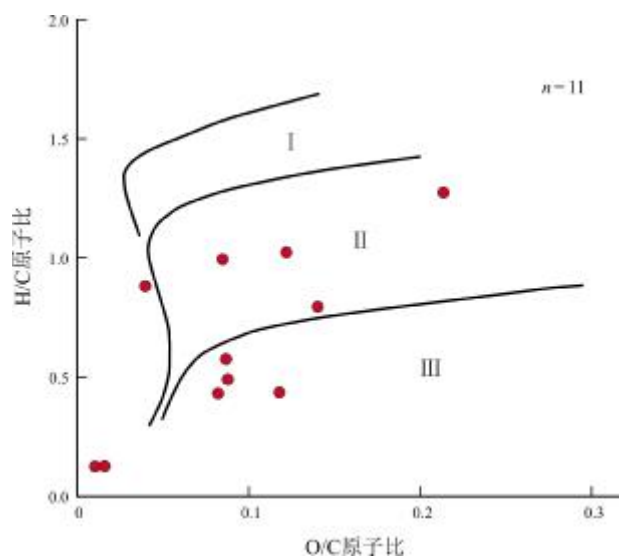


图6 吉白地2井林西组烃源岩H/C与O/C相关图

Fig. 6 Correlation between H/C and O/C of Linxi Formation source rocks in JBD-2 well

综合干酪根碳同位素组成与干酪根元素法判别林西组烃源岩有机质类型,林西组烃源岩有机质类型应以Ⅱ型干酪根为主,部分为Ⅲ型干酪根.

2.3 有机质成熟度

反映有机质成熟度的参数很多,由于干酪根的镜质体反射率(R_o)随热演化程度的升高而稳定增大,并具有相对广泛、稳定的可比性, R_o 成为目前应用最为广

泛、最为权威的成熟度指标,是确定烃源岩有机质成熟度的常用指标.而最高热解峰温($T_{\max}$)、自生伊利石结晶度(KI)等可作为有机质成熟度的辅助判别指标^[11].

2.3.1 镜质体反射率

吉白地2井上二叠统林西组烃源岩的镜质体反射率为1.39%~4.13%,平均值为2.98%(表1),其中高成熟烃源岩占10%,过成熟早期烃源岩占30%,过成熟晚期烃源岩占60%,整体处于高成熟—过成熟热演化阶段(图7).

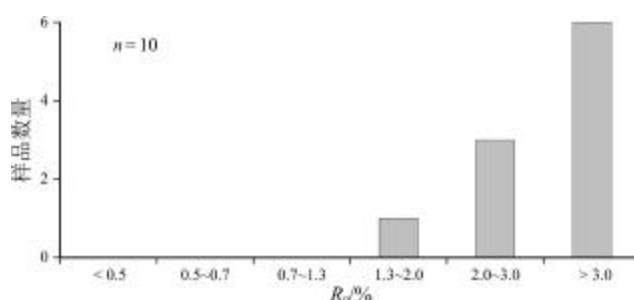


图7 吉白地2井林西组烃源岩 R_o 分布直方图

Fig. 7 R_o distribution histogram of Linxi Formation source rocks in JBD-2 well

从吉白地2井林西组纵向上的 R_o 值可以看出, R_o 值随深度的加深有变大的趋势,表明成熟度随着深度的加深有升高的趋势.此外侵入体附近的烃源岩成熟度均较高(图4),说明岩浆热液活动对烃源岩成熟度有一定影响,后期侵入的岩体导致烃源岩成熟度有所增高.

2.3.2 最高热解峰温($T_{\max}$)

吉白地2井林西组烃源岩的最高热解峰温($T_{\max}$)为300~546℃(图8).根据陆相烃源岩地球化学评价方法^[12],其中 $T_{\max}<435^\circ\text{C}$ 为11件,占比为58%,指示未成熟; $435^\circ\text{C}\leq T_{\max}\leq 440^\circ\text{C}$ 为1件,占比5%,指示低成熟; $440^\circ\text{C}<T_{\max}\leq 450^\circ\text{C}$ 为4件,占比21%,指示成熟; $450^\circ\text{C}<T_{\max}\leq 580^\circ\text{C}$ 为3件,占比16%,指示高成熟.从测试分析结果来看,有机质成熟度从未成熟—高成熟阶段均有分布,由于部分样品的热解烃(S_2)异常导致最高热解峰温($T_{\max}$)值失真,总体上 $T_{\max}$ 应处于 $>440^\circ\text{C}$ 的阶段,指示成熟—高成熟阶段.

2.3.3 伊利石结晶度

应用伊利石结晶度(KI)等相关参数可以很好地指示出成岩阶段,推出有机质热演化阶段^[17-19].

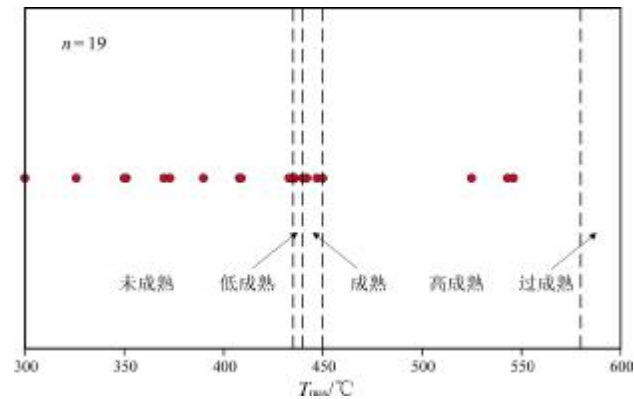


图 8 吉白地 2 井林西组烃源岩 $T_{\max}$ 分布图
Fig. 8 $T_{\max}$ distribution of Linxi Formation source rocks in JBD-2 well

对吉白地 2 井上二叠统林西组不同深度的 5 件暗色泥岩样品进行了伊利石结晶度的测试(表 3). KI 值($\Delta 2\theta$)为 0.26~0.84°, 平均值为 0.536°, 总体上表现为成岩作用阶段. 仅靠近花岗质岩脉的个别样品, KI 值为 0.26°, 处于极低级变质作用阶段.

综合研究认为吉白地 2 井林西组热演化程度高, 整体处于高熟—过成熟热演化阶段, 处于成岩作用阶段, 个别处于极低级的变质作用阶段.

表 3 吉白地 2 井林西组烃源岩伊利石结晶度数据表
Table 3 Illite crystallinity data of Linxi Formation source rocks in JBD-2 well

深度/m	岩性	伊利石结晶度 KI($\Delta 2\theta$)/(°)
1 923	黑色泥岩	0.55
1 925	黑色泥岩	0.84
1 926	黑色泥岩	0.26
1 928	黑色泥岩	0.50
1 995	黑色泥岩	0.53

3 生烃潜力分析

从吉白地 2 井上二叠统林西组有机地球化学综合柱状图(图 4)可知, 林西组烃源岩较发育, 主要为暗色泥岩, 部分为板岩. 由于吉白地 2 井未打穿林西组地层, 且地层受多期岩体侵入较为严重, 据此推测实际暗色泥岩沉积厚度可能更大.

吉白地 2 井部分烃源岩有机质丰度较高, 整体属于中等烃源岩的范畴, 具备一定的生烃物质基础. 有

机质类型以 II 型干酪根为主, 部分为 III 型干酪根. 统计北美各页岩气盆地结果显示, 烃源岩干酪根类型以 I 型、II 型为主, 仅部分地区为 III 型. 腐殖型和腐泥型的泥页岩中均可发育页岩气藏, 不同干酪根类型的泥页岩在一定的条件下都可生成大量的页岩气^[20]. 松辽盆地西部斜坡区的林西组烃源岩与北美地区的泥页岩具有一定相似性. 岩浆热液活动对烃源岩成熟度有一定影响, 其携带的高热流可以提高古地温, 后期侵入岩体的烘烤作用导致烃源岩成熟度有所增高, 整体处于高成熟—过成熟热演化阶段, 具备生气的条件. 同时泥页岩热演化程度高, 有利于次生孔隙的大量发育, 为游离气的赋存提供大量空间.

含气量是页岩气资源潜力评价和有利区带优选的重要指标. 楼任兴等^[21]对松辽盆地外围索伦—林西地区上二叠统林西组泥页岩进行等温吸附测试, 其含气量为 1.22~1.91 cm³/g, 相较于北美 Michigan 盆地 Antrim 页岩的含气量 1.13~2.83 cm³/g 以及 Illinois 盆地 New Albany 页岩的含气量 1.13~2.26 cm³/g^[22], 具有一定的可比性. 说明松辽盆地及外围地区林西组泥页岩具有较好的生烃潜力, 有利于页岩气的生成进而聚集成藏.

综上分析, 整体来看松辽盆地西部斜坡区上二叠统林西组烃源岩不仅有机质丰度较高、干酪根类型有利, 且成熟度较高, 具备一定的生烃潜力, 且以生气为主, 具有一定的页岩气资源勘探前景. 但该区岩浆活动较为强烈, 制约了页岩气大面积、高丰度富集, 因此, 寻找远离构造—岩浆活动、变质作用较微弱的有利区, 是未来松辽盆地及外围上古生界页岩气勘探的关键, 有望实现页岩气调查与勘探突破.

4 结论

(1) 松辽盆地西部斜坡区上二叠统林西组暗色泥岩发育, 烃源岩层数较多, 厚度较大, 烃源岩有机质丰度为中等, 有机质类型以 II 型干酪根为主, 部分为 III 型干酪根, 有机质演化达到高成熟—过成熟阶段, 整体处于成岩作用阶段.

(2) 综合分析认为该区林西组烃源岩以生气为主, 具有一定页岩气资源前景. 但该区岩浆活动较为强烈, 制约了页岩气大面积、高丰度富集. 因此, 寻找远离构造—岩浆活动、变质作用较微弱的有利区, 是未来

松辽盆地及外围上古生界页岩气勘探的关键,有望实现页岩气调查与勘探突破。

参考文献(References):

- [1]任收麦,乔德武,张兴洲,等.松辽盆地及外围上古生界油气资源战略选区研究进展[J].地质通报,2011,30(2/3):197-204.
Ren S M, Qiao D W, Zhang X Z, et al. The present situation of oil & gas resources exploration and strategic selection of potential area in the Upper Paleozoic of Songliao Basin and surrounding area, NE China [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3):197-204.
- [2]赵志魁,江涛,贺君玲.松辽盆地石炭系—二叠系油气勘探前景[J].地质通报,2011,30(2/3):221-227.
Zhao Z K, Jiang T, He J L. The oil and gas exploration prospect of Carboniferous-Permian in Songliao Basin, Northeastern China [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3):221-227.
- [3]陈树旺,张健,郑月娟,等.松辽盆地西部斜坡区上古生界油气地质调查进展与发现[J].中国地质调查,2019,6(1):1-9.
Chen S W, Zhang J, Zheng Y J, et al. Progresses and discoveries of geological survey on oil and gas resources related to the Upper Paleozoic in the western slope of Songliao Basin [J]. Geological Survey of China, 2019, 6(1):1-9.
- [4]张健,郑月娟,张德军,等.松辽盆地西缘高力板断陷高 D1 井地层划分对比[J].东北石油大学学报,2019,43(1):22-29.
Zhang J, Zheng Y J, Zhang D J, et al. Stratigraphic division and correlation of the borehole GD1 in the Gaoliban fault depression, western margin of Songliao Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(1):22-29.
- [5]Sun L, Wang C L, Bian X F. A new palynological assemblage from the Nenjiang Formation of Dayangshu Basin, and its geological implication [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2020, 94(1):198-199.
- [6]王成龙.松南东部断陷带与盆缘断陷层系综合地层对比研究[D].长春:吉林大学,2018.
Wang C L. Comprehensive stratigraphic correlation of the rift sequences in Eastern Fault Depression Belt of the Southern Songliao Basin and the margin area of the basin [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [7]Wang C L, Zhang M S, Sun K, et al. Latest zircon U-Pb geochronology of the Huoshiling Formation volcanic rocks in the southeastern margin of the Songliao Basin [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2017, 91(5):1924-1925.
- [8]张健,孙雷,苏飞,等.松辽盆地西缘高力板断陷油气勘探层系及资源前景[J].东北石油大学学报,2019,43(1):30-39.
Zhang J, Sun L, Su F, et al. Layer series of oil and gas exploration and resource prospect in Gaoliban fault depression in the west edge of Songliao Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(1):30-39.
- [9]张健,孙雷,何大祥,等.松辽盆地滨北西部上二叠统林西组烃源岩生物标志化合物的特征及意义[J].地质与资源,2019,28(4):350-357.
Zhang J, Sun L, He D X, et al. Biomarker compounds in the source rocks of Upper Permian Linxi Formation in western Binbei area, Songliao Basin: Characteristics and implications [J]. Geology and Resources, 2019, 28(4):350-357.
- [10]张永生,王延斌,卢振权,等.松辽盆地及外围地区石炭系—二叠系烃源岩的特征[J].地质通报,2011,30(2):214-220.
Zhang Y S, Wang Y B, Lu Z Q, et al. Characteristics of source rocks from Carboniferous-Permian in Songliao Basin and its peripheral area, Northeastern China [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2):214-220.
- [11]卢双舫,张敏.油气地球化学[M].北京:石油工业出版社,2008:171-226.
Lu S F, Zhang M. Petroleum geochemistry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 171-226. (in Chinese)
- [12]中国石油天然气总公司. SY/T 5735—1995 陆相烃源岩地球化学评价方法[S].北京:石油工业出版社,1996.
China National Petroleum Company. SY/T 5735—1995 Geochemical evaluation method of terrestrial hydrocarbon source rocks [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [13]魏仙样,陈高潮,魏建设,等.内蒙古西部阿拉善右旗芒罕超克地区上石炭统—二叠统阿木山组烃源岩的特征[J].地质通报,2011,30(6):879-887.
Wei X Y, Chen G C, Wei J S, et al. Characteristics of hydrocarbon source rocks in Amushan Formation in Manghanchao region of Alxa Right Banner, Western Inner Mongolia [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(6): 879-887.
- [14]卢进才,魏仙样,魏建设,等.内蒙古西部额济纳旗及邻区石炭系—二叠系烃源岩干酪根 C 同位素的特征和影响因素[J].地质通报,2010,29(2/3):384-391.
Lu J C, Wei X Y, Wei J S, et al. Kerogen carbon isotopic features and influencing factors of Carboniferous-Permian hydrocarbon source rocks in Ejina Banner and its vicinities, Western Inner Mongolia, China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(2/3): 384-391.
- [15]公繁浩,陈树旺,张健,等.内蒙古陶海营子地区上二叠统林西组泥岩热演化程度研究[J].地质与资源,2012,21(1):129-133.
Gong F H, Chen S W, Zhang J, et al. Study on the thermal evolution of the mudstone from Linxi Formation in Taohaiyingzi, Inner Mongolia [J]. Geology and Resources, 2012, 21(1): 129-133.

(下转第 332 页/Continued on Page 332)

- Zhao R. Exploration decision in Fuxin basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2003, 23(6): 58–61.
- [17] 商平. 辽西阜新盆地早白垩世含煤地层新认识[J]. *地层学杂志*, 1986, 10(2): 144–147.
- Shang P. New understandings of early Cretaceous coal-bearing strata in Fuxin Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 1986, 10(2): 144–147. (in Chinese)
- [18] 赵群, 王红岩, 杨慎, 等. 中国东部中小型断陷盆地陆相页岩气成藏潜力分析——以阜新盆地为例[J]. *天然气工业*, 2018, 38(5): 26–33.
- Zhao Q, Wang H Y, Yang S, et al. Potential of continental shale gas accumulation in medium- and small-sized fault basins in eastern China: A case study from the Fuxin Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(5): 26–33.
- [19] 王秀茹, 路爱平, 张欣宇. 阜新盆地含油气地层特征[J]. *地层学杂志*, 2007, 31(4): 385–390.
- Wang X R, Lu A P, Zhang X Y. The features of oil-and gas-bearing strata in the Fuxin Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(4): 385–390.
- [20] 姜立, 王延山, 吴飞勇. 阜新凹陷中北段油气成藏主控因素分析及有利目标预测[J]. *石油地质与工程*, 2014, 28(6): 4–7.
- Jiang L, Wang Y S, Wu F Y. Main controlling factors analysis and favorable targets prediction of hydrocarbon accumulation in central-northern part of Fuxin sag[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2014, 28(6): 4–7.
- [21] 秦建义, 郭菲. 阜新盆地石油地质条件基础分析[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2008, 25(1): 32–34.
- Qin J Y, Guo F. The fundamental analysis of the oil geological condition in Fuxin basin [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2008, 25(1): 32–34.
- [22] 邓胜徽, 卢远征, 樊茹, 等. 中国白垩纪植物群与生物地层学[J]. *地层学杂志*, 2012, 36(2): 241–265.
- Deng S H, Lu Y Z, Fan R, et al. Cretaceous floras and biostratigraphy of China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2012, 36(2): 241–265.
- [23] 陈义贤, 陈文寄. 辽西及邻区中生代火山岩: 年代学、地球化学和构造背景[M]. 北京: 地震出版社, 1997: 1–297.
- Chen Y X, Chen W J. The Mesozoic volcanic rocks in the western Liaoning province and its adjacent areas: geochronology, geochemistry and tectonic backgrounds [M]. Beijing: Seismological Press, 1997: 1–297. (in Chinese)
- [24] 席党鹏, 万晓樵, 李国彪, 等. 中国白垩纪综合地层和时间框架[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(1): 257–288.
- Xi D P, Wan X Q, Li G B, et al. Cretaceous integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(1): 256–286.
- [25] 刘森, 陈井胜, 张志斌, 等. 内蒙古平庄地区孙家湾组岩性及孢粉组合特征[J]. *地质与资源*, 2015, 24(2): 81–86.
- Liu M, Chen J S, Zhang Z B, et al. Characteristics of lithology and sporo-pollen assemblage of Sunjiawan Formation in Pingzhuang area, Inner Mongolia[J]. *Geology and Resources*, 2015, 24(2): 81–86.

(上接第 340 页/Continued from Page 340)

- [16] 蒂索 B P, 威尔特 D H. 石油形成和分布——油气勘探新途径[M]. 郝石生, 译. 北京: 石油工业出版社, 1982: 87–102.
- Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence: A new approach to oil and gas exploration [M]. Hao S S, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982: 87–102. (in Chinese)
- [17] 朱光. 用伊利石结晶度确定碎屑沉积岩甚低级变质等级[J]. *石油勘探与开发*, 1995, 22(1): 33–35.
- Zhu G. Grading the extreme-low metamorphic clastic sedimentary rocks by the crystallinity of the illite [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1995, 22(1): 33–35.
- [18] 朱莉, 朱敏. 合肥盆地中生界地层的热演化程度——伊利石结晶度的指示[J]. *安徽地质*, 2006, 16(3): 169–172.
- Zhu L, Zhu M. Thermal evolution stages for Mesozoic strata in the Hefei Basin: Constraints from illite crystallinity [J]. *Geology of Anhui*, 2006, 16(3): 169–172.
- [19] 张勇, 曹雪晴, 任凤楼, 等. 合肥盆地烃源岩有机质热演化历史分析[J]. *沉积学报*, 2008, 26(1): 168–177.
- Zhang Y, Cao X Q, Ren F L, et al. Thermal evolution history analysis of source rocks of Hefei Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(1): 168–177.
- [20] 蒲泊伶, 包书景, 王毅, 等. 页岩气成藏条件分析——以美国页岩气盆地为例[J]. *石油地质与工程*, 2008, 22(3): 33–36.
- Pu B L, Bao S J, Wang Y, et al. Analysis on condition of shale gas accumulation: A studying case from shale gas basin in America [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2008, 22(3): 33–36. (in Chinese)
- [21] Lou R X, Dong Q S, Nie H. Exploration prospects of shale gas resources in the Upper Permian Linxi Formation in the Suolun-Linxi Area, NE China [J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(2): 1100–1107.
- [22] 李政. 东营凹陷页岩气勘探潜力初步评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- Li Z. Exploration potential analyses of the shale gas in Dongying Depression [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.