

方正断陷不同成因天然气地球化学特征及成藏模式

柳波^{1,2}, 陆军^{1,2}, 吕延防¹, 付广¹, 王世辉³, 金玮³

(1. 东北石油大学 非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室培育基地, 黑龙江 大庆 163318;

2. 黑龙江省高等学校科技创新团队“断裂变形、封闭性及与流体运移”, 黑龙江 大庆 163318;

3. 中国石油 大庆油田有限公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:方正断陷天然气成因类型复杂,查明气源对其天然气勘探具有重要意义。根据天然气组分及烷烃碳同位素特征,结合成气地质背景,对天然气的成因类型进行了分析。通过不同构造单元的烃源岩有机质类型及热演化程度差异,对比天然气热成熟度并进行气源探讨。结果表明:方正断陷天然气可以分为3类。A类天然气为干气,成因类型为催化过渡带气,为新安村组-乌云组湖相泥岩所生;B类天然气为湿气,成因类型为热成因煤型气,与腐殖型有机质生成的原油相伴生,为煤系泥岩所生;C类天然气亦为湿气,成因类型以热成因油型气为主,具有一定的腐殖型有机质生气贡献,与腐殖型有机质生成的原油相伴生,为混源气。伊汉通断裂两侧构造的差异活动是造成东、西两个次天然地球化学特征及成藏模式有明显差异的最主要因素。

关键词:天然气组分;烷烃碳同位素;天然气成因;气-源对比;方正断陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical characteristics and accumulation models of different genetic types of natural gas in the Fangzheng Fault Depression

Liu Bo^{1,2}, Lu Jun^{1,2}, Lyu Yanfang¹, Fu Guang¹, Wang Shihui³, Jin Wei³

(1. Accumulation and Development of Unconventional Oil and Gas, State Key Laboratory Cultivation Base Jointly-constructed by Heilongjiang Province and the Ministry of Science and Technology, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. "Fault Deformation, Sealing and Fluid Migration" Science and Technology Innovation Team in Colleges and Universities of Heilongjiang, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company Limited, CNPC, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: Because of the complicated genetic types of gas, accurate identification of the sources of the nature gas has great significance to gas exploration in the Fangzheng Fault Depression. First, the genetic types of natural gas were classified based on the gas components, alkane carbon isotopes and in combination with the actual geological conditions. Then, the thermal maturity of gas was correlated with source rocks in different tectonic units to reveal the gas sources based on identification of organic types and thermal evolution degree. The results show that the gas of this area can be divided into three types. Type A is dry gas and its genetic type is catalytic transitional zone gas generated by lacustrine mudstone in the Xin'ancun-Wuyun Formations. Type B is wet gas and its genetic type is thermal coal-related gas generated by coal measure mudstones. Type C is also wet gas and its genetic type is petroliferous gas generated partly by humic organic matter. It is associated with the oil generated by humic organic matters and is of hybrid sources. Differential structural activity on two sides of Yihantong fault is the main factor leading to the different geochemical characteristics and accumulation patterns of natural gas between the east and west sags.

Key words: gas component, alkane carbon isotope, origin of natural gas, gas-source correlation, Fangzheng Fault Depression

方正断陷位于黑龙江省东部,是松辽盆地外围油气勘探的重点探区之一^[1-2]。1996年部署的方3井在新安村组-乌云组2 871.0~2 939.0 m井段自喷获54 340 m³/d的工业气流,从而发现了方3井区气藏。随

后钻探的方4井又获日产油78.8 t、气22 522 m³,方15井获得日产油15.3 t、气54 940 m³,皆显示了方正断陷除具有丰富的石油资源外,同样具有较好的天然气勘探前景。方3井由于具有较轻的甲烷碳同位素,前人研究

收稿日期:2015-01-21;修订日期:2015-03-10。

第一作者简介:柳波(1983—),男,博士、副教授,油气成藏地质学和非常规油气地质。E-mail:liubo6869@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41472125);国家青年自然科学基金项目(41202101);中国博士后科学基金面上资助项目(2013M541338);黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12541084);黑龙江省青年科学基金项目(QC2015043);黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2015077)。

普遍认为其成因类型为生物气^[3]。由于天然气埋藏深度较大(接近 3 000 m),虽然在特殊的地质条件下,微生物生存的极限温度可达 110 ℃^[4],但研究区显然不具备这种条件,天然气赋存的地层温度为 78~85 ℃,超过了生物气大量繁殖的最佳温度^[5],不可能为单一生物成因。此外,各井天然气地球化学特征还存在明显的差异,显示出其可能具有不同的成因类型。那么方正断陷天然气成因究竟为何?又有什么差异?针对这一问题,本文系统地分析了研究区所有产气井的天然气组分和烷烃碳同位素特征,深度探讨了天然气的成因及来源,以期为今后方正断陷的天然气勘探提供重要的理论依据。

1 地质背景

方正断陷是位于依舒地堑中段的一个双断式槽状断陷,呈北东向 40°~50°展布,南邻尚志断隆,北接依兰断隆,面积约 1 460 km²,发现探井 30 口。在天然气勘探方面,发现工业气流井 2 口(方 3 井和方 401 井)以及工业油气流井 4 口(方 4 井、方 402 井、方 12 井和方 15 井),已提交天然气预测储量 38.86×10⁸ m³。

根据方正断陷主要地震反射层的现今构造形态、主要目的层沉积特征和地层分布规律,将方正断陷整体

划分为东部断陷带和西部断陷带两个二级构造单元。东部断陷带可进一步划分为玉山屯单斜带、李家店次凹、民丰断裂构造带、德善屯次凹、大林子次凹和大罗密断阶带 6 个三级单元;西部断陷带可进一步划分为小兰屯背斜带、柞树岗次凹和祥顺潜山带 3 个三级构造带。影响和控制次级构造单元的断层是方正断陷两条边界断层和与之大体平行的一条主控断层。前者控制方正断陷的边界,后者控制二级构造带的分布和发育,是主要的继承性断层。这 3 条断层为北东走向,使得 2 个次级构造单元也呈北东向展布(图 1)。

断陷基底为古生界变质岩系,其上充填了白垩系方正组、古近系新安村组-乌云组(E₂x-E₁w)、达连河组(E₂d)、宝泉岭组(E₃b)、新近系富锦组(N₁f)及第四系^[6]。其中,新安村组-乌云组由灰色砂砾、砂岩和浅灰色粉岩与暗色泥岩、煤层不等厚互层组成,是方正断陷最重要的烃源岩发育层位。天然气样品主要采集自柞树岗、大林子次凹的新安村组-乌云组和宝泉岭组地层。

2 天然气地球化学特征

天然气组分可分为烃类气体与非烃气体两类。方

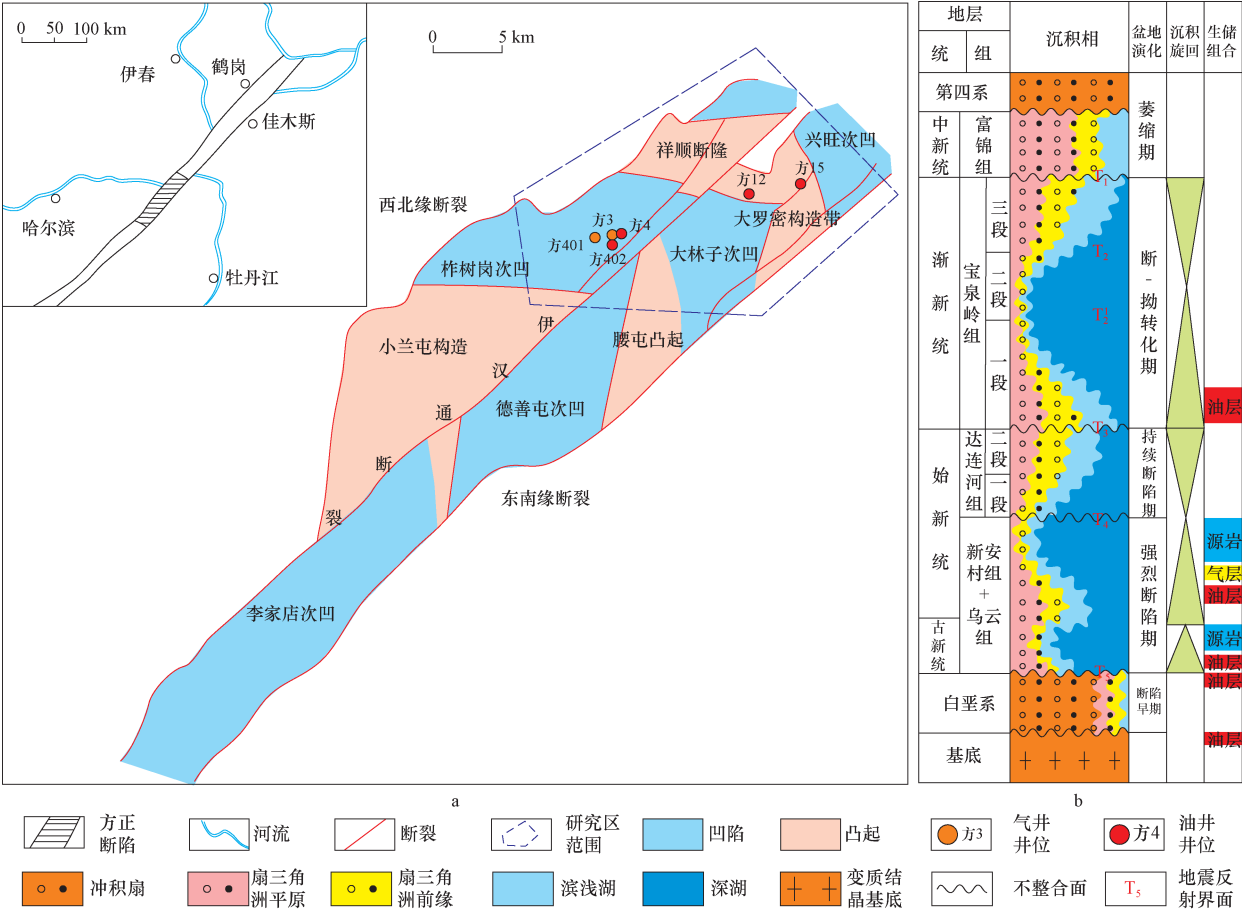


图 1 方正断陷区域构造位置 a) 及地层发育剖面 b)

Fig. 1 Regional structural location a) and stratigraphic section b) of the Fangzheng Fault Depression

正断陷天然气组分中烃类气体含量变化在 69.08% ~ 99.67%, 反映烃类气体含量占绝对优势。非烃气体以 CO_2 和 N_2 为主, 其它成分含量甚微。研究天然气的组成特征, 对分析天然气的成因及气藏形成规律都有重要意义^[7-8]。

2.1 天然气组分特征

各井天然气甲烷含量变化范围较大, 为 61.148% ~ 99.228%。重烃气含量变化范围为 0.661% ~ 24.805%, 且随着单井油产量的增高而增加。与天然气甲烷和重烃气含量相对应, 根据干燥系数的大小, 方正断陷天然气具有干气和湿气两种类型。干气见于方 3 井和方 401 井, 单井不产油, 干燥系数分别为 99.2% 和 99.3%。其他各井天然气皆为湿气, 且同时获得工业油流, 其中方 4 井和方 402 井的天然气干燥系数较为接近, 分别为 73.6% 和 79.0%; 方 12 井和方 15 井天然气干燥系数为 89.4% 和 92.5% (表 1)。

$i\text{C}_4/n\text{C}_4$ 和 $i\text{C}_5/n\text{C}_5$ 是两个比较有效的成熟度参数, 低温下以碳阳离子断裂为主, 主要产物为异构烷烃, 高温则以自由基断裂占优势, 主要产物为正构烷烃^[9]。因此, 随着有机质成熟度的增加, $i\text{C}_4/n\text{C}_4$ 和 $i\text{C}_5/n\text{C}_5$ 比值逐渐降低并趋于稳定, 同时这两项参数受扩散运移效应影响明显, 随着运移距离的增加比值逐渐增大^[10]。研究区天然气色谱分析结果表明 (表 2): 方 3 井天然气具有较高的 $i\text{C}_4/n\text{C}_4$ 和 $i\text{C}_5/n\text{C}_5$ 比值, 分别为 3.615 ~ 5.000 和 3.000 ~ 6.500, 均大于 3; 方 401 井天然气异丁烷含量为 0.088% ~ 0.084%, 异戊烷含量为 0.020% ~ 0.021%, 正丁烷与正戊烷含量极低, 同样具有较高的 $i\text{C}_4/n\text{C}_4$ 和 $i\text{C}_5/n\text{C}_5$ 比值。这两口井天然气藏紧邻烃源岩层系, 这两项参数的变化应主要受控于成熟度, 即其天然气生成的成熟度较低, 而其他各井天然气 $i\text{C}_4/n\text{C}_4$ 和 $i\text{C}_5/n\text{C}_5$ 比值分别分布在

1.184 ~ 1.907 和 1.684 ~ 2.671, 均小于 3, 比值并没有明显增大, 受运移效应影响不明显, 表明这些井发现的天然气可能均为有机质在正常成熟度条件下所生成。

2.2 天然气烷烃碳同位素特征

天然气烷烃碳同位素分布及系列碳同位素特征^[11-12], 也同样具有较强的差异性 (表 3)。方 3 井和方 401 井烷烃碳同位素最轻, 整体上具有正碳同位素系列; 方 4 井和方 402 井烷烃碳同位素整体偏重, 甲烷碳同位素轻于方 12 井和方 15 井, 而重烃碳同位素略重于方 12 井和方 15 井; 方 12 井和方 15 井甲烷碳同位素最重, 方 15 井部分样品天然气碳同位素序列倒转, 可能揭示了该类天然气具有一定的混合成因。

3 天然气成因分析

天然气成因类型的判别主要是在地质背景下, 依赖于天然气的组分和碳同位素组成, 并以天然气伴生原油的轻烃地球化学特征为辅。本区天然气可以划分为 A 类、B 类和 C 类。A 类天然气包括方 3 井和方 401 井; B 类天然气包括方 4 井和方 402 井; C 类天然气包括方 12 井和方 15 井。

3.1 天然气形成的地质背景

一般认为, 生物气藏埋深最大不超过 2 000 m, 且生成生物气的极限温度在 75 °C。方 3 井天然气埋藏深度 2 888.50 ~ 2 954.80 m, 地层温度在 78 ~ 85 °C, 地层压力为 27.77 ~ 29.54 MPa, 不具备生物气大规模生成的埋藏和温度条件^[13]。

3.2 天然气烷烃碳同位素组成

根据天然气 $\text{C}_1/\text{C}_{1-5}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_1$ 关系图版 (图 2) 可

表 1 方正断陷天然气组分含量

Table 1 Gas component contents in the Fangzheng Fault Depression

井号	埋深/m	层位	样品数/ 个	组分含量/%					
				C_1	C_{1+}	C_{2+}	CO_2	N_2	C_1/C_{1+}
方 3	2 888 ~ 2 952	$\text{E}_2x - \text{E}_1w$	9	96.873	97.534	0.661	1.049	1.378	0.993
				95.420 ~ 98.317	96.263 ~ 99.028	0.558 ~ 0.843	0.162 ~ 2.553	0.676 ~ 2.036	0.991 ~ 0.994
方 4	3 214 ~ 3 234	$\text{E}_2x - \text{E}_1w$	5	69.408	94.213	24.805	0.932	4.851	0.736
				61.148 ~ 74.762	93.111 ~ 94.979	20.200 ~ 31.963	0.807 ~ 1.098	4.203 ~ 5.791	0.657 ~ 0.787
方 401	2 960 ~ 2 992	$\text{E}_2x - \text{E}_1w$	2	98.856	99.671	0.815	—	0.330	0.992
				98.483 ~ 99.228	99.341 ~ 100.000	0.772 ~ 0.858	—	0 ~ 0.659	0.991 ~ 0.992
方 402	3 276 ~ 3 300	$\text{E}_2x - \text{E}_1w$	1	77.937	98.681	20.744	0.753	0.565	0.790
方 12	1 901 ~ 1 906	$\text{E}_2x - \text{E}_1w$	3	61.774	69.083	7.309	27.312	3.606	0.894
				61.162 ~ 62.085	68.538 ~ 69.406	7.231 ~ 7.376	26.971 ~ 27.509	3.139 ~ 4.492	0.892 ~ 0.896
方 15	1 587 ~ 1 969	$\text{E}_2x - \text{E}_1w$, E_3b^1	3	89.542	96.784	7.242	1.534	1.683	0.925
				84.301 ~ 92.846	92.737 ~ 99.224	5.544 ~ 8.436	0 ~ 4.220	0.771 ~ 3.043	0.909 ~ 0.944

注: $\text{E}_2x - \text{E}_1w$ 为古近系新安村组 - 乌云组; E_3b^1 为古近系宝泉岭组一段; 表中数据为 $\frac{\text{平均值}}{\text{最小值} \sim \text{最大值}}$ 。

表 2 方正断陷天然气组分色谱分析

Table 2 Chromato graphic analysis of natural gas components in the Fangzheng Fault Depression

井号	层位	样品数/个	iC_4/nC_4	iC_5/nC_5	相对密度
方 3	E_2x-E_1w	9	4.050	4.021	0.576
			3.615~5.000	3.000~6.500	0.568~0.591
方 4	E_2x-E_1w	5	1.247	1.87	0.817
			1.184~1.295	1.684~1.984	0.770~0.888
			—	—	0.561 6
方 401	E_2x-E_1w	2	—	—	0.559 9~0.563 3
方 402	E_2x-E_1w	1	1.503	1.977	0.739
方 12	E_2x-E_1w	3	1.906	1.770	0.912
			1.905~1.907	1.768~1.770	0.912~0.914
方 15	E_2x-E_1w ,	3	1.692	2.444	0.647
	E_3b^1		1.492~1.864	2.073~2.671	0.615~0.690

注: E_2x-E_1w 为古近系新安村组-乌云组; E_3b^1 为古近系宝泉岭组一段;表中数据为平均值
最小值~最大值。

表 3 方正断陷天然气烷烃碳同位素特征

Table 3 Alkane carbon isotope characteristics of natural gas in the Fangzheng Fault Depression

井号	埋深/m	样品数/个	$\delta^{13}C_1/\text{‰}$	$\delta^{13}C_2/\text{‰}$	$\delta^{13}C_3/\text{‰}$	$\delta^{13}C_4/\text{‰}$
方 3	2 950~2 952	1	-53.5	-43.8	-30.7	-30.9
方 4	3 214~3 234	3	-49.1	-28.0	-26.2	-25.7
			-50.3~-47.5	-28.8~-27.2	-26.9~-25.3	-25.8~-25.5
方 401	2 960~2 992	3	-52.4	-41.1	-30.8	-29.6
			-53.9~-51.5	-41.3~-40.9	-31.1~-30.5	-30.0~-29.2
方 402	3 276~3 300	1	-49.1	-26.8	-25.6	-25.0
方 12	1 901~1 906	3	-41.6	-28.8	-27.7	-27.6
			-41.7~-41.4	-28.9~-28.8	-27.7	-27.7~-27.5
方 15	1 587~1 969	5	-44.7	-30.7	-30.3	-30.5
			-45.4~-44.1	-31.8~-30.2	-31.1~-29.8	-30.8~-30.1

注:表中数据为平均值
最小值-最大值。

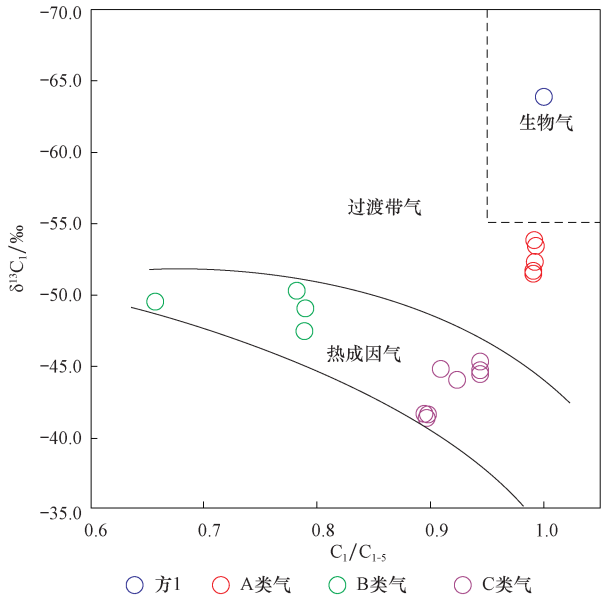


图 2 方正断陷天然气 $C_1/C_{1-5}-\delta^{13}C_1$ 关系图版^[15]

Fig. 2 Relation between C_1/C_{1-5} and $\delta^{13}C_1$ of gas in the Fangzheng Fault Depression^[15]

知,A 类天然气属于有机质低熟阶段生成的催化过渡带气,而 B 类和 C 类天然气为热成因气,而非前人认识的生物气。图版中可见方 1 井天然气样品落在生物气区,其埋深为 810~834 m,这可能才是真正意义上的生物气类型。

目前常采用 $\delta^{13}C_2$ 为 -28‰ 作为油型气和煤型气的界限^[14]。根据天然气 $\delta^{13}C_1$ 与 $\delta^{13}C_2$ 关系图版(图 3)可知,方 1 井天然气为生物气,A 类天然气为催化过渡带气,B 类天然气为热成因煤型气,C 类天然气为热成因油型气。

4 天然气气源探讨

4.1 气源岩有机质类型及演化程度

通过热解参数 $T_{\max}$ (最高热解峰温)及 HI (氢指数)

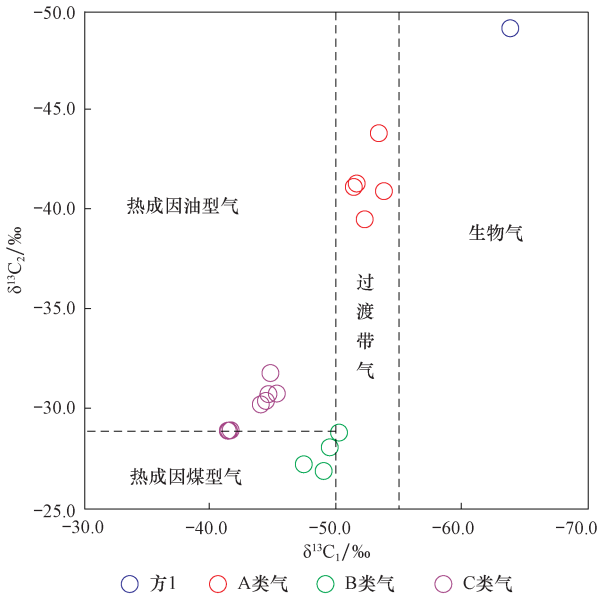


图 3 方正断陷天然气 $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2$ 关系图版^[16]

Fig. 3 Relation between $\delta^{13}C_1$ and $\delta^{13}C_2$ of gas in the Fangzheng Fault Depression^[16]

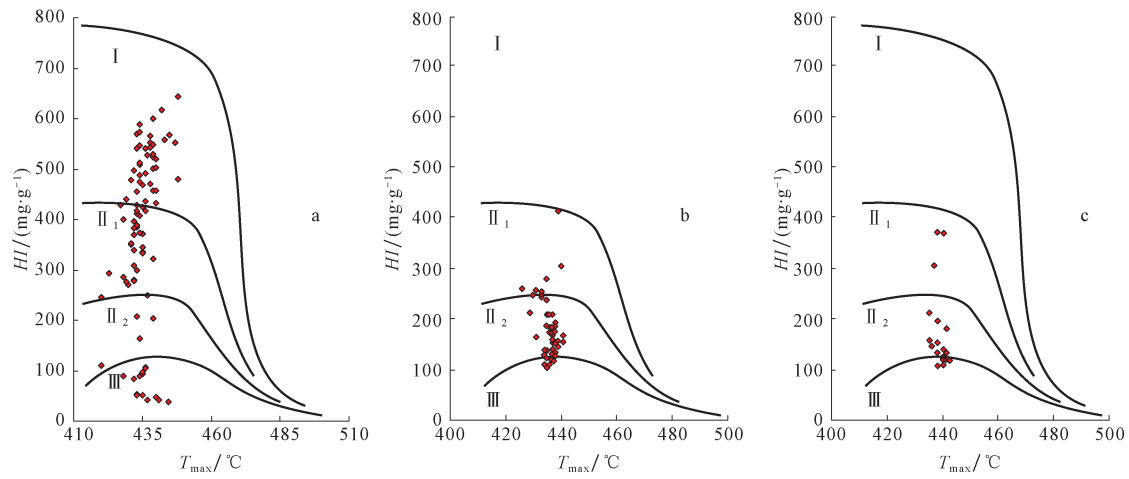


图 4 方正断陷各次凹新安村组 - 乌云组有机质类型划分

Fig. 4 Classification of organic matter types of Xin'ancun-Wuyun Formations in all subsags of the Fangzheng Fault Depression

a. 柞树岗次凹, 方 4 井; b. 大林子次凹北部, 方 15 井; c. 大林子次凹南部, 方 10 井

可确定烃源岩有机质类型,在收集了大量热解数据的基础上,对全区主要探井的新安村组 - 乌云组暗色泥岩的有机质类型进行了判断。结果表明,柞树岗次凹烃源岩有机质类型最好,以 II₁ 型干酪根为主, R_o (镜质体反射率) 值为 0.54% ~ 0.71%, 平均为 0.59%, 有机质热演化程度最低; 大林子次凹北部有机质类型以 II₂ 型干酪根为主 (方 15 井), 南部以 III 型干酪根为主 (方 10 井), R_o 值为 0.52% ~ 0.73%, 平均为 0.62%。根据两个次凹埋深及样品分布情况可知, 大林子次凹有机质热演化程度高于柞树岗次凹 (图 4)。

4.2 气 - 源成熟度对比

戴金星等研究了我国不同地区天然气烷烃碳同位素系列与 R_o 的关系, 提出了适合我国天然气成熟度计算的回归方程^[17-18]; 徐永昌等提出了催化过渡带气概念并修改了煤型气回归方程, 也提出了天然气成熟度的计算公式^[19]。本次研究借鉴前人的经验公式, 得到了方正断陷天然气的成熟度 (表 4)。结果发现, 用戴金星等提出的油型气和煤型气甲烷回归模型计算出的天然气成熟度明显偏低, 与乙烷、丙烷回归模型计算结

果十分不匹配, 而根据徐永昌等提出的过渡带气回归模型计算出的结果比较符合实际情况。结果表明, 柞树岗次凹天然气生成的 R_o 为 0.62% ~ 0.69%, 大林子次凹天然气生成的 R_o 为 0.77% ~ 0.83%, 煤型气的成熟度普遍高于油型气。

通过对比天然气成熟度与烃源岩热演化程度可知: A 类天然气为演化程度较低、有机质类型较好的柞树岗次凹泥岩所生; B 类天然气为演化程度略高、有机质类型偏差的柞树岗次凹泥岩所生; 由于大林子次凹钻井皆位于构造高部位, 揭示新安村组 - 乌云组烃源岩的 R_o 最大为 0.89%, 演化程度未达到 0.94%, 根据本区烃源岩 R_o 与深度的对应关系及烃源岩顶面埋深可知, 大林子次凹深凹部位演化程度更高, R_o 可以达到 1.5% 以上, 因此推测 C 类天然气对应于大林子次凹中心部位的烃源岩。

4.3 天然气伴生原油生物标志物对比

A 类天然气为干气, 钻井未见油流, 无法获取伴生原油的地球化学特征。

B 类天然气与原油相伴生 (图 5), 规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{28} < C_{27} < C_{29}$, 三峰呈反“L”型, 是以陆源高等植物为主的腐殖型有机质贡献为主^[20], 与热成因煤型气的成因类型相对应, 并且与本区柞树岗次凹新安村组 - 乌云组煤系泥岩生物标志物特征相似。

C 类天然气为油型气, 但伴生原油 Pr/Ph 高, 分布区间为 5.27 ~ 8.04, 平均为 6.14, 均大于 5, 具有典型的煤系地层有机质特征^[21-22], 规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{28} < C_{27} < C_{29}$ (图 6)。综合该类天然气碳同位素较轻, 即 $\delta^{13}C_1 < -40\text{‰}$, $\delta^{13}C_2 < -28\text{‰}$, 并且部分样品具有碳同位素序列倒转的特点, 认为该类天然气以热成因油型气为主, 具有少量的煤型气混合。

表 4 方正断陷天然气成熟度计算结果
Table 4 Maturity calculation of gas in the Fangzheng Fault Depression

井号	深度/m	戴金星公式 R_o			徐永昌公式 R_o		计算依据
		计算结果/%			计算结果/%		
		$\delta^{13}C_1$	$\delta^{13}C_2$	$\delta^{13}C_3$	$\delta^{13}C_1$		
方 3	2 888.5 ~ 2 949.9	0.42	—	—	0.62		油型气
方 401	2 960.0 ~ 2 991.8	0.47	—	—	0.66		油型气
方 4	3 214.0 ~ 3 234.0	0.35	0.76	0.74	0.69		煤型气
方 402	3 276.3 ~ 3 299.7	0.35	0.87	0.80	0.69		煤型气
方 12	1 901.0 ~ 1 906.0	0.96	—	—	1.08		油型气
方 15	1 586.6 ~ 1 614.2	0.78	—	—	0.94		油型气

5 天然气成藏模式

大林子次凹与柞树岗次凹分别位于伊汉通断裂东、西两侧,两个次级凹陷构造发育史不同,是决定天然气成藏规律不同的重要因素(图 7)。

新生代以来受太平洋板块斜向俯冲以及印度板块

向欧亚大陆碰撞作用的联合影响,依舒地堑发生右旋伸展,强烈裂陷形成一系列新生代盆地。此时方正断陷受东、西边界断裂控制发育扇三角洲-湖泊沉积体系,新安村组-乌云组沉积早期在西部柞树岗次凹和东部大林子次凹发育了一套含煤烃源岩,后期沉积演化为一套湖相烃源岩。

达连河组沉积后盆地经历强烈抬升剥蚀,新安村

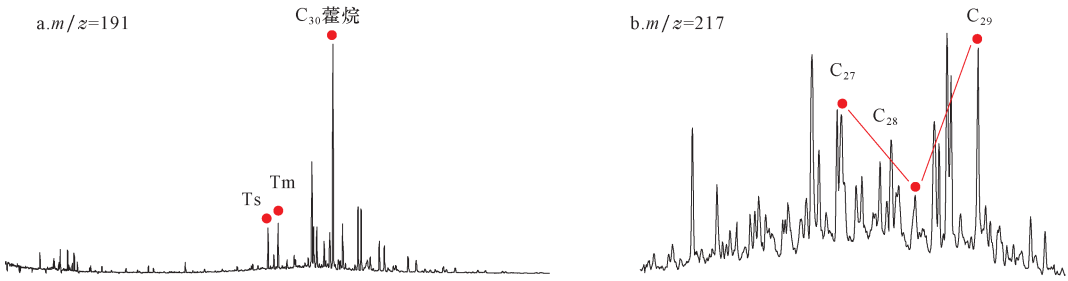


图 5 B 类天然气伴生原油生物标志物色谱-质谱(方 4 井)
Fig. 5 Biomarker GC-MS map of type B gas associated with crude oil(Well Fang-4)

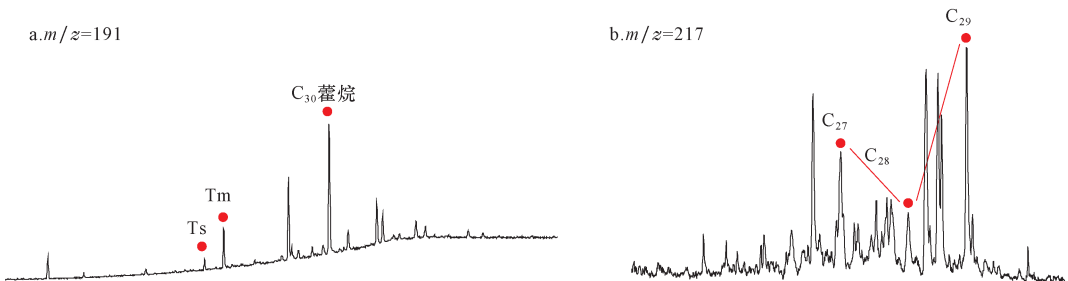


图 6 C 类天然气伴生原油生物标志物色谱-质谱(方 15 井)
Fig. 6 Biomarker GC-MS map of type C gas associated with crude oil(Well Fang-15)

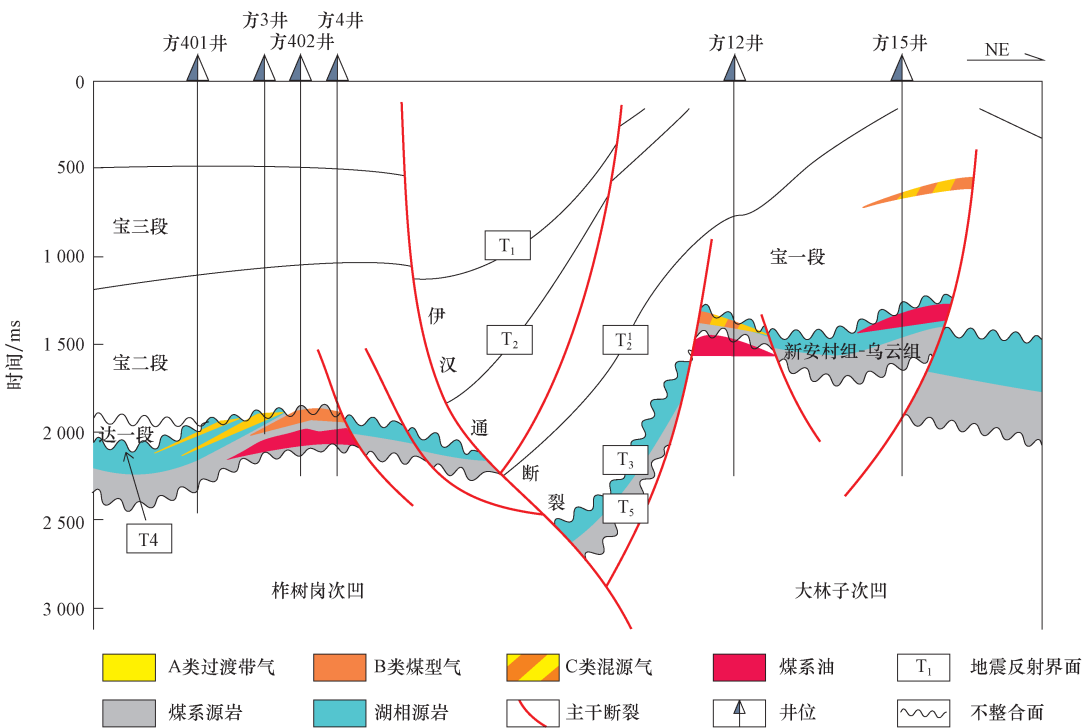


图 7 方正断陷天然气成藏模式
Fig. 7 Gas accumulation model of the Fangzheng Fault Depression

组-乌云组顶部的湖相泥岩在方4井附近剥蚀殆尽。宝泉岭组沉积时期水进作用明显,湖泊范围扩大,发育湖泊及辫状河三角洲沉积体系,沉积了大套厚层泥岩,形成了本区最为重要的油气区域盖层。

随着盆地沉积范围进一步扩大,断陷进入断-拗转换时期。该时期伊汉通断裂发育成熟,形成了贯穿盆地的断裂,吸收了盆地大部分应变。边界断裂活动性逐渐减弱导致西部柞树岗次凹地层被动沉降,而伊汉通断裂强烈活动造成东部大林子次凹快速沉降。沉降速度的差异使得西部凹陷烃源岩演化较东部凹陷相对缓慢,为柞树岗次凹相对富集低熟气提供了生气演化条件。

宝泉岭组末期,盆地压扭反转。反转变形集中于受伊汉通断裂和东边界断裂夹持的地堑内,东部地层大幅度抬升,强烈活动的断层在垂向上断穿层位较多,不同类型有机质生成的天然气发生了混合,并且部分富集于浅层宝一段,形成了“近源断层输导纵向成藏模式”:即油气纵向上多层位分布,断裂是油气成藏的主要通道,与有效源岩沟通并长期发育的断裂系统是该区重要的油源断裂,在运移路径上与之配置的下盘背斜圈闭是油气聚集场所。而西部凹陷反转作用则相应降低,发育的早期和早、中期断裂不活动,仅沿西边界断裂发育小型反转褶皱,气藏保存条件较好,使得过渡带气与煤型气地球化学特征截然不同,形成了“源内分层富集成藏模式”。

6 结论

1) 方正断陷天然气可以划分为3类。柞树岗次凹分布了催化过渡带气和热成因煤型气两种类型,分别对应于柞树岗次凹湖相泥岩及煤系泥岩所生;大林子次凹天然气为腐泥腐殖型有机质生成天然气的混合,以热成因油型气为主,具有一定的煤型气贡献。

2) 沉降速度的差异使得西部凹陷烃源岩演化较东部凹陷相对缓慢,为柞树岗次凹相对富集低熟气提供了生气演化条件。后期反转强度的差异使得西部凹陷保存条件好,过渡带气与煤型气地球化学特征截然不同,而东部不同类型天然气发生了混合,且聚气层位丰富。

参 考 文 献

- [1] 曹成润,王子文,张树林. 佳-伊地堑方正断陷的断裂控盆效应[J]. 大庆石油学院学报,1996,20(3):1-5.
Cao Chengrun, Wang Ziwen, Zhang Shulin. Fault control effect at Fangzheng Fault Depression in Jia-Yi Graben[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1996, 20(3):1-5.
- [2] 胡玉双,齐仁理,魏亚荣,等. 方正断陷中部发育走滑断层的地震证据及有利区带预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2010,40(6):1271-1277.
Hu Yushuang, Qi Renli, Wei Yarong, et al. Seismic evidence of strike-slip faults in the middle of Fangzheng Rift and favorable exploration areas[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(6):1271-1277.
- [3] 孙永红,迟宏. 方正断陷天然气成因特征及勘探意义[C]. 第十届全国有机地球化学学术会议论文摘要汇编,无锡,2005:225-226.
Sun Yonghong, Chi Hong. Genesis characteristics of natural gas and its prospecting significance of Fangzheng fault depression[C]. The tenth national conference on organic geochemistry abstract compilation, Wuxi, 2005:225-226.
- [4] Ruihong Zhang, Zhiqin Zhang. Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system[J]. Bioresource Technology, 1999, 68(4):235-245.
- [5] 张义纲,陈焕疆. 论生物气的生成和聚集[J]. 石油与天然气地质,1983,4(2):160-169.
Zhang Yigang, Chen Huanjiang. Concepts on the generation and accumulation of biogenic gas[J]. Oil & Gas Geology, 1983, 4(2):160-169.
- [6] 黄清华,杨建国,孔惠. 东北依兰-伊通地堑方正断陷方正组的建立及其意义[J]. 地层学杂志,2003,27(2):138-145.
Huang Qinghua, Yang Jianguo, Kong Hui. The Fangzheng Formation of the Fangzheng rift in the northeast of the Yilan-Yitong rift valley and its significance[J]. Journal of Stratigraphy, 2003, 27(2):138-145.
- [7] 谭彦虎,任冰,雷涛,等. 柴达木盆地里坪地区天然气成藏条件与勘探潜力[J]. 天然气地球科学,2012,23(5):891-896.
Tan Yanhu, Ren Bing, Lei Tao, et al. The conditions of natural gas accumulation and exploration potential in Yiliping Region, Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(5):891-896.
- [8] 刘亚明,谢寅符,马中振,等. 南美前陆盆地古生界天然气成藏特征及勘探潜力分析[J]. 天然气地球科学,2012,23(6):1045-1053.
Liu Yaming, Xie Yinfu, Ma Zhongzhen, et al. The exploration potential and accumulation characteristics of Paleozoic gas foreland basins in South America[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(6):1045-1053.
- [9] 李广之,吴向华. 异构比 $\varphi_{iC4}/\varphi_{nC4}$ 和 $\varphi_{iC5}/\varphi_{nC5}$ 的石油地质意义[J]. 物探与化探,2002,26(2):135-139.
Li Guangzhi, Wu Xianghua. The petroleum geological significance of isomerization rates $\varphi_{iC4}/\varphi_{nC4}$ and $\varphi_{iC5}/\varphi_{nC5}$ [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2002, 26(2):135-139.
- [10] 唐宇,吕正祥,叶素娟,等. 成都凹陷上侏罗统蓬莱镇组天然气运移特征与富集主控因素[J]. 石油与天然气地质,2013,34(3):281-287.
Tang Yu, Lv Zhengxiang, Ye Sujuan, et al. Characteristics and controlling factors of natural gas migration and accumulation in the Upper Jurassic Penglaizhen Formation of Chengdu Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3):281-287.
- [11] 王铁冠,宋到福,李美俊,等. 塔里木盆地顺南-古城地区奥陶系鹰山组天然气气源与深层天然气勘探前景[J]. 石油与天然气地质,2014,35(6):753-762.
Wang Tieguan, Song Daofu, Li Meijun, et al. Natural gas source and deep gas exploration potential of the Ordovician Yingshan Formation in the Shunnan-Gucheng region, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6):753-762.
- [12] 顾忆,黄继文. 塔河油田天然气特征对比与成因分析[J]. 石油与天然气地质,2014,35(6):820-826.
Gu Yi, Huang Jiwen. Characteristics comparison and origin of natural gas in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6):820-826.
- [13] 帅燕华,张水昌,赵文智,等. 陆相生物气纵向分布特征及形成机理研究—以柴达木盆地涩北一号为例[J]. 中国科学 D 辑(地球科学),2007,37(1):46-51.
Shuai Yanhua, Zhang Shuichang, Zhao Wenzhi, et al. Vertical distribution characteristics and formation mechanism of continental biogenic gas—taking Sebei No. 1 in the Qaidam Basin as an example[J]. Chinese Science D (Earth Science), 2007, 37(1):46-51.

- bution characteristics and the formation mechanism of the biogenic gas in the Sebei No. 1 reservoir, the Qaidam Basin[J]. *Scientia Sinica (Earth Sciences)*, 2007, 37(1): 46–51.
- [14] 廖凤蓉, 吴小奇, 黄士鹏, 等. 川西北地区中坝气田雷口坡组天然气地球化学特征及气源探讨[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(1): 108–115.
- Liao Fengrong, Wu Xiaoqi, Huang Shipeng, et al. Geochemical characteristics and gas source correlation of Leikoupo Formation in Zhongba field, northwest Sichuan basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(1): 108–115.
- [15] 刘文汇, 徐永昌. 论生物-热催化过渡带气[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(4): 30–36.
- Liu Wenhui, Xu Yongchang. Bio-thermocatalytic transitional zone gases[J]. *Petroleum exploration and development*, 2005, 32(4): 30–36.
- [16] 何家雄, 陈伟煌, 李明兴. 莺-琼盆地天然气成因类型及气源剖析[J]. *中国海上油气(地质)*, 2000, 14(6): 398–405.
- He Jiaxiong, Chen Weihuang, Li Mingxing. Genetic types of natural gas and source rocks in Ying-qiong basin[J]. *China offshore oil and gas (geology)*, 2000, 14(6): 398–405.
- [17] 戴金星, 戚厚发, 宋岩, 等. 我国煤层气组份、碳同位素类型及其成因和意义[J]. *中国科学 B 辑(化学)*, 1986, 16(12): 1317–1326.
- Dai Jinxing, Qi Houfa, Song Yan, et al. China's coalbed gas composition, carbon isotope types and its causes and significance[J]. *SCIEN-TIA SINICA Chimica*, 1986, 16(12): 1317–1326.
- [18] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. *中国科学 B 辑(化学)*, 1992, 22(2): 1317–1326.
- Dai Jinxing. Identification of various alkane gases[J]. *Scientia Sinica (Chimica)*, 1992, 22(2): 1317–1326.
- [19] 沈平, 徐永昌. 中国陆相成因天然气同位素组成特征[J]. *地球化学*, 1991, (2): 144–152.
- Shen Ping, Xu Yongchang. The isotopic composition of natural gases from continental sediments in China[J]. *Geochimica*, 1991, (2): 144–152.
- [20] 邹才能, 赵文智, 龙道江. 吐鲁番盆地侏罗系煤系原油的基本性质及油源对比[J]. *石油学报*, 1993, 14(1): 25–33.
- Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Long Daojiang. The basic features of crude oil from Jurassic coal-bearing formations in Turfan Basin and the correlation study between oil and source rocks[J]. *Acta Perolei Sinica*, 1993, 14(1): 25–33.
- [21] 孙林, 李剑锋, 姬鹏程, 等. 鄂尔多斯盆地西缘上古生界泥岩饱和烃 Pr/Ph 值特征及其地质应用[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(6): 1116–1120.
- Sun Lin, Li Jianfeng, Ji Pengcheng, et al. Pr/Ph value of saturated hydrocarbon from the Upper Paleozoic mudstone in western Ordos Basin and its applications[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(6): 1116–1120.
- [22] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别. *天然气地球科学*, 1993, 4(2–3): 1–40.
- Dai Jinxing. Carbon isotope characteristics and the identification of various natural gas. *Natural Gas Geoscience*, 1993, 4(2–3): 1–40.

(编辑 张玉银)

(上接第 369 页)

- [10] 张克信, 王国灿, 季军良, 等. 青藏高原古近纪-新近纪地层分区与序列及其对隆升的响应[J]. *中国科学*, 2010, 40(12): 1271–1294.
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Ji Junliang, et al. Paleogene-Neogene stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qinghai-Tibet Plateau and their response to uplift of the plateau[J]. *Science China*, 2010, 40(12): 1271–1294.
- [11] 杜佰伟, 谭富文, 陈明. 西藏伦坡拉盆地沉积特征分析及油气地质分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 2004, 24(4): 46–54.
- Du Baiwei, Tan Fuwen, Chen Ming. Sedimentary features and petroleum geology of the Lunpola Basin, Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2004, 24(4): 46–54.
- [12] 罗宇, 朱宏权, 艾华国, 等. 西藏伦坡拉盆地地下第三系储集层类型与特征[J]. *石油勘探与开发*, 1999, 26(2): 35–37.
- Luo Yu, Zhu Hongquan, Ai Huaguo, et al. Type and feature of Lower Tertiary reservoirs in Lunpola basin. [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(2): 35–37.
- [13] 艾华国, 朱宏权, 张克银, 等. 伦坡拉盆地地下第三系储层的成岩作用和储集性能的成岩控因[J]. *沉积学报*, 1999, 17(1): 100–105.
- Ai Huaguo, Zhu Hongquan, Zhang Keyin, et al. The diagenetic controlling-factors of reservoir property and diageneses of reservoir of Lower-Tertiary in Lunpola Basin, Tibet[J]. *Acta Sedimentological Sinica*, 1999, 17(1): 100–105.
- [14] 艾华国, 兰林英, 朱宏权, 等. 伦坡拉盆地地下第三系储集层成岩作用和孔隙演化[J]. *石油勘探与开发*, 1998, 25(6): 12–15.
- Ai Huaguo, Lan Linying, Zhu Hongquan, et al. The diagenesis and porosity evolution of the Lower Tertiary system in Lunpola basin, Tibet. [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1998, 25(6): 12–15.
- [15] 张克银, 牟泽辉, 朱宏权, 等. 西藏伦坡拉盆地成藏动力学系统分析[J]. *新疆石油地质*, 2000, 21(2): 93–96.
- Zhang Keyin, Mu Zehui, Zhu Hongquan, et al. Analysis of the dynamic system for forming reservoirs in Lunpola Basin(Tibet)[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2000, 21(2): 93–96.
- [16] 孙涛. 西藏伦坡拉盆地古近系层序地层学及岩性圈闭研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- Sun Tao. Sequence stratigraphy and lithologic trap predication in Lunpola Basin, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [17] 吴珍彦, 胡道功, 叶培盛, 等. 青藏高原中段古近纪早期古构造演化[J]. *地球学报*, 2009, 30(6): 749–760.
- Wu Zhenhan, Hu Daogong, Ye Peisheng, et al. Paleocene-Eocene tectonic evolution in Central Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2009, 30(6): 749–760.
- [18] 徐正余, 饶克敏, 连玉秋. 西藏伦坡拉地区的大地构造属性与构造演化[J]. *中国区域地质*, 1983, (3): 90–98.
- Xu Zhengyu, Rao Kemin, Lian Yuqiu. Geotectonic attributes and tectonic evolution of the Lunpola aree, Xizang(Tibet)[J]. *Regional Geology of China*, 1983, (3): 90–98.
- [19] 张大伟. 西藏地区油气资源潜力与战略选区[J]. *中国矿业*, 2011, 20(3): 1–5.
- Zhang Dawei. Potential of hydrocarbon resources and strategic research in Tibet area[J]. *China Mining Magazine*, 2011, 20(3): 1–5.
- [20] 邓虎成, 周文, 丘东洲. 西藏伦坡拉盆地油砂资源潜力分析[J]. *桂林工学院学报*, 2008, 28(2): 167–173.
- Deng Hucheng, Zhou Wen, Qiu Dongzhou. Oil sand resource latent capacity in Lunpola Basin, Tibet[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2008, 28(2): 167–173.

(编辑 张亚雄)