

文章编号: 0253-9985(2005)04-0501-04

徐深 1 井深层天然气地球化学特征 与各类气源岩的贡献

张居和, 李景坤, 闫 燕

(大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712)

摘要: 徐深 1 井 4 个井段天然气甲烷组分都占烃类含量的 97% 以上, 演化程度随着埋深而增加。随着演化程度加深, 链烷烃脱甲基、环烷烃开环作用、芳构化作用和烷基化程度不断提高。营城组天然气甲烷碳同位素值比乙烷的重, 碳同位素值都有反序特征; 火石岭组天然气甲烷碳同位素值为 -29.20% , 乙烷碳同位素值未检测到。徐深 1 井营城组具有腐殖型特征, 处于高-过成熟演化阶段; 火石岭组则具有腐泥型特征, 为高-过成熟天然气。利用烃源岩及天然气烃指纹色谱技术和模拟计算软件建立了源岩贡献比例计算模板。经模板计算, 徐深 1 井营城组天然气来自沙河子组烃源岩的占 54% 以上; 火石岭组天然气来自火石岭组烃源岩的占 50%, 来自沙河子组烃源岩的占 43.08%。营城组和石炭-二叠系烃源岩对营城组和火石岭组天然气的贡献均较小。

关键词: 贡献比例; 气源岩; 成熟度; 母质类型; 碳同位素; 色谱烃指纹; 徐深 1 井

中图分类号: TE112.1 **文献标识码:** A

Geochemical features of natural gas in deep reservoirs in Xushen 1 well and Contribution of various source rocks

Zhang Juhe, Li Jingkun, Yan Yan

(Exploration and Development Research Institute of Daqing Oil Field Company Ltd., Daqing, Heilongjiang)

Abstract The methane content accounts for over 97% of natural gas compositions in the 4 pay zones in Xushen 1 well. The degree of hydrocarbon evolution increases with depth, which is accompanied by demethylation of alkanes, ring opening of cycloalkanes, aromatization and heightening alkylating degree. For the gas in Yingcheng Fm, the carbon isotope values of methane are heavier than that of ethane. For the gas in Huoshiling Fm, the carbon isotope value of methane is -29.20% , but the carbon isotope value of ethane is not detectable. The source rocks in Yingcheng Fm in Xushen 1 well are characterized by their humic-type organic matters, and is in high-to overmature evolution stage. While the source rocks in Huoshiling Fm are characterized by their sapropelic-type organic matters, and generate high-to overmature natural gas. A quantitative model for natural gas generation is developed by using the hydrocarbon fingerprint chromatograms of source rocks and natural gas and mathematic simulation software. Calculation results show that the source rocks in Shahezi Fm would have contributed over 54% of gas to the reservoir in Yingcheng Fm in Xushen 1 well, while the source rocks in Huoshiling and Shahezi Fms would have contributed 50% and 43.08% of gas to the reservoir in Huoshiling Fm, respectively. Only very little gas in the Yingcheng and Huoshiling Fms have been derived from the Yingcheng Fm and Permian-Carboniferous source rocks.

Key words Xushen 1 well; hydrocarbon fingerprint chromatogram; carbon isotope; type of parent material; maturity; gas source rock

徐深 1 井是在松辽盆地北部徐家围子断陷兴城北“凹中隆”构造上的一口深预探井(完钻井深

4 548 m), 在营城组试气获得 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流, 无阻挡产量为 $1.18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ 天然气, 揭示了

深层天然气勘探的巨大潜力和良好前景。搞清徐深 1 井深层天然气成因类型、成熟度等地化特征及各套气源岩贡献比例,对指导松辽盆地北部深层天然气勘探有重要意义^[1 2]。

1 天然气地球化学特征

1.1 基本组成

从徐深 1 井天然气组成色谱分析^[3](表 1)结果看,4 个井段天然气甲烷组分都占烃类含量的 97%以上,氮气、二氧化碳、氢、氦含量分别低于 1.44%, 4.00%, 0.04%, 0.03%;该井天然气都属于干气,从浅到深天然气烃碳数范围由 C₁—C₆ 变窄为 C₁—C₂,甲烷占烃类含量由 97.139% 提高到 99.890%,随着埋深的增加天然气变得越来越“干”,即演化程度随着埋深而增加。

1.2 烃指纹特征

从徐深 1 井天然气烃指纹气相色谱分析^[4](图 1)结果看,C₁—C₉ 烃指纹共检测出 90 多种单体烃化合物。从天然气重烃指纹组成数据(表 2)

可知,徐深 1 井 4 个井段天然气烃指纹基本地化特征与组成有所不同,随埋深增加正构烷烃和芳烃相对含量增加、异构烷烃和环烷烃相对含量减小,即随着演化程度加深链烷烃脱甲基、环烷烃开环作用、芳构化作用和烷基化程度不断提高。

1.3 组分碳同位素

从徐深 1 井天然气组分碳同位素分析^[5 6]结果(表 3)看,营城组和火石岭组天然气甲烷和乙烷碳同位素值变化范围分别为 -29.20‰ ~ -26.54‰ 和 -31.68‰ ~ -30.1‰。其中,营城组甲烷碳同位素值比乙烷的重,3 个层位碳同位素值都有反序特征。火石岭组天然气甲烷碳同位素值为 -29.20‰,乙烷碳同位素值未检测到。

2 天然气地球化学指标判别

2.1 色谱烃指纹参数

2.1.1 母质类型

利用甲基环己烷指数(MC_{yc})、环己烷指数(C_{yc})、苯指数等^[4 7-9]能够识别不同成因类型的

表 1 徐深 1 井天然气组成分析数据
Table 1 Analytical data of gas components in Xushen 1 well

井 深 /m	组分含量 /%							
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀ —C ₆ H ₁₄	N ₂	CO ₂	H ₂	He
3 364.0~3 379.0	92.341	2.340	0.319	0.064	0.925	3.991	0.018	0.002
3 447.0~3 573.8	93.351	2.295	0.393	0.129	1.145	2.553	0.036	0.022
3 578.4~3 705.2	93.483	2.314	0.302	0.100	1.430	2.618	0.032	0.021
4 435.2~4 480.0	96.107	0.106	0.000	0.000	1.332	2.430	0.004	0.020

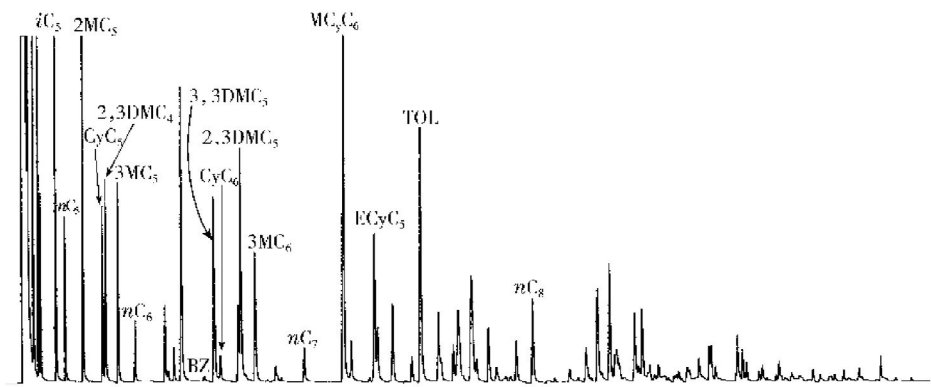


图 1 徐深 1 井天然气烃指纹气相色谱图

Fig. 1 Hydrocarbon fingerprint chromatogram of natural gas in Xushen 1 well

注: iC₅—异戊烷; nC₅—正戊烷; 2MC₅—2-甲基戊烷; CyC₅—环戊烷; 2,3DMC₄—2,3-二甲基丁烷; 3MC₅—3-甲基戊烷; nC₆—正己烷; BZ—苯; 3,3DMC₅—3,3-二甲基戊烷; CyC₆—环己烷; 2,3DMC₅—2,3-二甲基戊烷; 3MC₆—3-甲基己烷; nC₇—正庚烷; MC_{yc}—甲基环己烷; EC_{yc}—乙基环戊烷; TOL—甲苯; nC₈—正辛烷

天然气。徐深 1 井天然气母质类型指标 (表 4) 表明营城组具有腐殖型特征, 火石岭组则具有腐泥型特征。

2.1.2 成熟度

烃指纹成熟度指标环烷指数 i_v 、环烷指数 $\textcircled{E}$ 、庚烷值和石蜡指数^[4 7~9]能够判别天然气的演化阶段 (表 5)。综合几项指标判定营城组处于高-过成熟演化阶段, 火石岭组腐泥型天然气为高-过成熟天然气。

2.2 组分碳同位素

徐深 1 井营城组和火石岭组天然气甲烷和乙烷碳同位素值 (表 3) 分别大于 -31.68‰ 和 -29.20‰ 。在母质类型上甲烷碳同位素反映出腐殖型特征, 乙烷碳同位素反映出腐泥型特征。组分碳同位素有反序特征反映出徐深 1 井天然气具混合气特征。 $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1$ 小于 -2.03‰ , 表明徐深 1 井天然气都具有过成熟气特征^[8~12]。

2.3 综合评价

天然气中的烃类是由 $\text{C}_1 - \text{C}_{12}$ 100 多种单体烃化合物组成, 组分碳同位素测定的一般是 $\text{C}_1 - \text{C}_5$

烃类, 而天然气烃指纹技术主要测定 $\text{C}_5 - \text{C}_{12}$ 烃类。当两种技术判别母质类型结果一致时, 说明天然气未受不同母质成生的干扰; 当两种技术判别结果不一致时, 说明不同母质类型烃类分子发生了混合。

利用组分碳同位素和色谱烃指纹指标综合判定徐深 1 井天然气是以煤成气为主的深层混合气, 处于高-过成熟演化阶段。

3 天然气源岩贡献比例

3.1 理论依据

色谱烃指纹比值参数和组分碳同位素指标是天然气和气源岩对比研究的主要地球化学方法^[8~10], 即烃源岩吸附烃与其所生成的天然气的指纹参数具有相似性。不同层位烃源岩性质和地质环境差异的影响, 使不同层位烃源岩吸附烃中存在可测量到的色谱烃指纹差异; 同一层位烃源岩由于性质和地质环境的相似性使其具有相似性, 而天然气与各层位烃源岩吸附烃色谱指纹参数的差异性主要是不同源天然气混合的结果。

表 2 天然气重烃指纹组成数据
Table 2 Fingerprint components of heavy hydrocarbons in natural gas

井 深 /m	组分含量 /%			
	正构烷烃	异构烷烃	环烷烃	芳烃
3 364.0~3 379.0	29.22	56.30	12.12	1.36
3 447.0~3 573.8	38.39	47.19	11.98	2.44
3 578.4~3 705.2	44.22	42.56	10.75	2.47
4 435.2~4 480.0	47.65	38.689	10.62	3.05

表 3 徐深 1 井天然气组分碳同位素数据
Table 3 Carbon isotopes of natural gas components in Xushen 1 well

样 号	井 段 /m	层 位	$\delta^{13}\text{C}_1 / \text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_2 / \text{‰}$
1	3 364.0~3 379.0	K ₁ yc	-28.43	-30.46
2	3 447.0~3 573.8	K ₁ yc	-26.80	-30.10
3	3 578.4~3 705.2	K ₁ yc	-26.54	-31.68
4	4 435.2~4 480.0	J ₃ hs	-29.20	未检测到

表 4 徐深 1 井天然气母质类型判别
Table 4 Discrimination of parent material types of natural gas in Xushen 1 well

井 段 /m	$\text{MCyC}_6 / \%$	$\text{CyC}_6 / \%$	$i\text{C}_5 / n\text{C}_5$	苯指数 /%	甲苯指数 /%	甲苯 / 苯	成因类型
3 364.0~3 379.0	81.38	63.10	2.86	5.88	248.39	60.21	腐殖型
3 447.0~3 573.8	87.27	35.35	3.93	12.08	626.82	38.16	腐殖型
3 578.4~3 705.2	86.43	33.98	3.58	76.77	508.36	3.16	腐殖型
4 435.2~4 480.0	33.02	15.13	0.37	0.50	9.23	6.67	腐泥型

表 5 徐深 1 井天然气成熟度判别
Table 5 Discrimination of gas maturity in Xushen 1 well

井 深 /m	环烷指数 i_v	环烷指数 $\textcircled{E}$	庚烷值 /%	石蜡指数	演化阶段
3 364.0~3 379.0	0.98	1.49	20.21	2.42	高-过成熟
3 447.0~3 573.8	0.77	1.01	20.37	16.58	高-过成熟
3 578.4~3 705.2	0.53	1.26	25.17	19.35	高-过成熟
4 435.2~4 480.0	0.24	0.61	42.29	2.41	高-过成熟

3.2 贡献比例计算

3.2.1 样品采集及烃指纹分层指标

徐深 1 井钻遇的深部地层有登娄库组 (K_1d)、营城组 (K_{1yc})、沙河子组 (K_1sh) 和火石岭组 (J_3hs), 烃源岩主要分布在沙河子组和火石岭组, 沙河子组和火石岭组泥质岩综合评价为差一中等烃源岩、煤岩为中等—好烃源岩, 有机质母质类型以 ④型 为主、 ③型 次之, 储气层主要为营城组和火石岭组。为分析营城组和火石岭组中天然气的来源, 采集了徐深 1 井及该地区营城组 (K_{1yc})、沙河子组 (K_1sh)、火石岭组 (J_3hs) 和石炭—二叠系 (C—P, 该地区其他井的千枚岩、泥板岩等) 的烃源岩样 33 块作为实验样品。

从源岩吸附烃色谱指纹分析结果 (表 6) 看, 该地区烃源岩吸附烃色谱特征指纹参数在同一层位内有的数值接近、有的变化较大, 但均有一定的变化范围; 在每套层位之间, 从营城组到沙河子组

和火石岭组, 有部分数值重叠, 变化是连续的、渐变的, 而石炭—二叠系的大多数特征参数指标与上覆地层的指标呈突变式变化特征, 反映石炭—二叠系有特殊的生气条件。若采用一个或几个特征指纹参数, 则难以区分 4 套烃源岩及建立合适的计算模板, 故必须采用多个特征指纹参数。根据同一套烃源岩相似性原则取其平均值作为该套烃源岩的特征指纹参数值, 即为 4 套烃源岩吸附烃特征指纹参数分层指标数据 (表 6 图 2)。

3.2.2 计算结果

将分层指标数据通过不同混合配比得到一系列特征指纹参数值, 输入模拟计算软件, 通过数学训练^[13]建立气源岩贡献比例模拟计算模板, 最后将不同井段天然气色谱特征烃指纹参数输入计算模板, 获得不同气源岩贡献比例 (表 7)。从表 7 中可以看出, 徐深 1 井营城组 3 个井段天然气来自沙河子组烃源岩的占 54% 以上, 沙河子组为主力

表 6 烃源岩色谱烃指纹特征参数分析结果

Table 6 Analytical data of fingerprint characteristic parameters from chromatograms of source rocks

特征参数	层 位			
	K_{1yc}	K_1sh	J_3hs	C—P
2# / 3#	2.87~ 3.63 (3.13)	1.53~ 3.55 (2.19)	1.59	0.39~ 0.86 (0.52)
4# / 5#	0.83~ 1.94 (1.05)	0.36~ 0.77 (0.57)	0.53	1.14~ 2.01 (1.38)
5# / 6#	1.28~ 2.32 (1.84)	1.47~ 1.95 (1.54)	1.78	0.44~ 0.81 (0.73)
6# / 7#	1.49~ 1.79 (1.59)	1.28~ 1.70 (1.43)	0.73	1.43~ 1.88 (1.45)
7# / 8#	0.63~ 1.45 (0.92)	0.65~ 0.95 (0.69)	0.81	0.29~ 0.40 (0.32)
13# / 10#	1.73~ 4.42 (2.92)	2.12~ 4.53 (3.27)	3.08	1.39~ 1.65 (1.55)
4# / 6#	1.05~ 2.87 (1.87)	0.63~ 0.94 (0.75)	0.94	0.88~ 0.93 (0.91)
5# / 7#	1.93~ 4.82 (3.11)	1.57~ 3.53 (2.68)	1.31	0.75~ 1.34 (1.08)
8# / 5#	0.12~ 0.87 (0.84)	0.29~ 1.43 (0.69)	0.94	0.22~ 0.47 (0.33)
6# / 8#	0.84~ 2.60 (1.64)	0.61~ 2.31 (1.28)	0.61	0.39~ 0.51 (1.19)

注: 2#—异戊烷; 3#—正戊烷; 4#—2,2-甲基丁烷; 5#—环戊烷; 6#—2-甲基戊烷; 7#—3-甲基戊烷; 8#—正己烷; 10#—甲基环戊烷; 13#—环己烷; 括号中为平均值

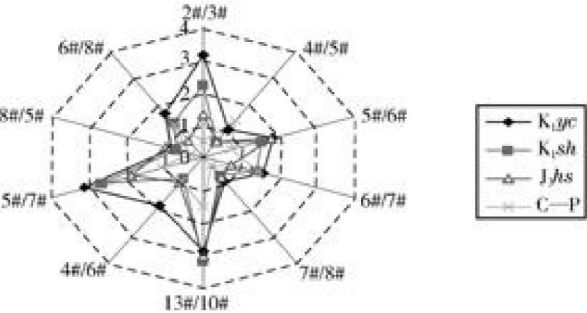


图 2 不同烃源岩色谱烃指纹分层指标参数差异性图
Fig. 2 Diagram showing differences in zonal fingerprint chromatogram indexes for various source rocks

表 7 徐深 1 天然气气源岩贡献比例计算结果

Table 7 Calculated gas volumes derived from various gas source rocks in Xushen 1 well

井 段 /m	源岩贡献比例 /%			
	K_{1yc}	K_1sh	J_3hs	C—P
3 364.0~ 3 379.0	12.49	54.72	30.18	2.59
3 447.0~ 3 573.8	8.79	59.28	28.50	3.40
3 578.4~ 3 705.2	10.31	57.03	27.22	5.42
4 435.2~ 4 480.0	0.00	43.08	50.07	6.83

(下转第 511 页)

- (4): 376~ 381
- 5 孙玉善,赵孟军,杨帆.由沥青产状及地球化学特征分析碳酸盐岩油藏的成藏期次——以塔中 6 井为例[J].新疆石油地质, 1995, 20(5): 394~ 397
Sun Yushan, Zhao Mengjun, Yang Fan. Analysis of reservoir-forming stages of carbonate reservoir from occurrence and geochemistry of asphalt: an example from Tazhong 6 well area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1995, 20(5): 394~ 397
 - 6 覃建雄,张长俊,李天生,等.西昌盆地流体包裹体及其在油气勘探中的应用[J].石油与天然气地质, 1994, 15(3): 216~ 225
Qin Jianxiong, Zhang Changjun, Li Tiansheng, et al. The fluid inclusions of Xichang basin and its application in the petroleum exploration[J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15(3): 216~ 225
 - 7 王红军,蔡迎春.流体包裹体常规特征在油气成藏研究中的应用[J].石油勘探与开发, 2000, 27(5): 50~ 56
Wang Hongjun, Cai Yingchun. Applications of general characteristics of fluid inclusions to the study of oil and gas pool formation[J]. Petroleum Exploration & Development, 2000, 27(5): 50~ 56
 - 8 Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. AAPG Bull, 1990, 74(10): 1559~ 1570
 - 9 邱楠生,蔡进功,李善朋,等.昌潍坳陷潍北凹陷热历史及油气成藏期次[J].地质科学, 2003, 38(3): 413~ 424
Qiu Nansheng, Cai Jingong, Li Shanpeng, et al. Thermal evolution and hydrocarbon entrapment in the Weibei sag, Changwei depression[J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(3): 413~ 424

(编辑 高 岩)

(上接第 504 页)

烃源岩;火石岭组储气层中的天然气,来自火石岭组源岩的占 50%,来自沙河子组烃源岩的仍达到 43.08%,这可能是由于其他埋藏较深的沙河子组烃源岩产气后侧向运移所致;营城组和火石岭组天然气中,石炭—二叠系烃源岩的贡献比例平均小于 5%。

参 考 文 献

- 1 石昕,石宝珩.我国天然气地质理论与天然气工业的发展[J].石油与天然气地质, 1999, 20(3): 263~ 266
Shi Xin, Shi Baoheng. Development of geological theory and industry for natural gases in China[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(3): 263~ 266
- 2 李广之.轻烃地球化学场的形成和特征[J].石油与天然气地质, 1999, 20(1): 66~ 69
Li Guangzhi. Formation and characteristics of light hydrocarbon geochemistry fields[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 66~ 69
- 3 GB/T 13610-2003 天然气的组成分析气相色谱法[S]
GB/T 13610-2003 Gas chromatography of natural gas component analysis[S]
- 4 张居和,李景坤,冯子辉,等.利用天然气重烃对比松辽盆地北部深层气[J].地质地球化学, 1997, 25(4): 50~ 56
Zhang Juhe, Li Jingkun, Feng Zihui, et al. Studies of deep-seated gas in northern Songliao basin using analytical results of heavy hydrocarbons in natural gases[J]. Geology Geochemistry, 1997, 25(4): 50~ 56
- 5 SY 5238-91 天然气中氢碳氧同位素制样方法[S]
SY 5238-91, Sample prescription methods of hydrogen, carbon and oxygen isotopes in natural gas[S]
- 6 SY 5239-91 石油和沉积有机质的氢碳同位素分析方法[S]
SY 5239-91, Analytical methods of hydrogen and carbon isotopes in petroleum and sedimentary organic matter
- 7 戴金星.利用轻烃鉴别煤成气和油型气[J].石油勘探与开发, 1993, 20(5): 26~ 32
Dai Jinxing. Identification of coal formed gas and oil type gas by light hydrocarbons[J]. Petroleum Exploration & Development, 1993, 20(5): 26~ 32
- 8 张义纲.天然气的生成聚集和保存[M].南京:河海大学出版社, 1991. 55~ 65
Zhang Yigang. Formation, accumulation and preservation of natural gas[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1991. 55~ 65
- 9 钱志浩,曹寅,王从凤,等.石油地质实验测试技术新进展[M].北京:地质出版社, 1994. 178~ 185
Qian Zhihao, Cao Yin, Wang Congfeng, et al. New progress of experimental and testing techniques in petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. 178~ 185
- 10 戴金星.天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J].天然气地球科学, 1993, 4(2~ 3): 232~ 240
Dai Jinxing. Carbon and hydrogen isotope features of natural gas and discrimination of different types of natural gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 4(2~ 3): 232~ 240
- 11 张义刚.识别天然气的碳同位素方法[A].见:张义刚,编.有机地球化学论文集[C].北京:地质出版社, 1987. 26~ 59
Zhang Yigang. Discrimination of natural gas by carbon isotope means[A]. In: Zhang Yigang, ed. Organic geochemistry collection [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1987. 26~ 59
- 12 刘文汇,刘全有,徐永昌,等.天然气地球化学数据的获取及应用[J].天然气地球科学, 2003, 14(1): 21~ 29
Liu Wenhui, Liu Quanyou, Xu Yongchang, et al. Collection and application of natural gas geochemical data[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(1): 21~ 29
- 13 卢新卫,金章东.前馈神经网络的岩性识别方法[J].石油与天然气地质, 1999, 20(1): 82~ 84
Lu Xinwei, Jin Zhangdong. Method of lithologic recognizing based on feedforward neural network[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 82~ 84

(编辑 李 军)