

文章编号:1000-0550(2004)增刊-0045-05

松辽盆地北部深层凝析油及油型气的成因研究

冯子辉^{1,2} 冯志强² 刘伟² 王雪² 关秋华²

1(吉林大学 长春 130061)

2(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 松辽盆地北部深层发现的凝析油及油型气扩大了油田的勘探潜力。应用单体烃碳同位素、生物标志化合物等分析技术,结合地质背景对凝析油、天然气和固体沥青进行的地球化学研究表明:深层凝析油包括煤成凝析油和泥质烃源岩形成的凝析油,前者芳烃含量高、单体烃碳同位素重,后者饱和烃含量高、单体烃碳同位素轻,生物标志化合物对比,二者均来自于沙河子组烃源岩;油型气甲烷碳同位素轻,一般小于 -45% ,且甲烷与乙烷之间碳同位素分馏明显,属原油裂解成气特征,油型气与煤型气混合可能是深层天然气碳同位素系列倒转的重要原因之一;火山岩储层中的固体沥青有机地球化学分析,有机碳含量 $0.08\% \sim 0.16\%$,氢指数 $49 \sim 297 \text{ mg/g}$, R_o 大约为 1.87% ,表征固体沥青现今的成烃潜力较小,原油向天然气转化主要发生在高成熟阶段的晚期,对应的地质年代大约是嫩江组—明水组沉积末($80 \sim 65 \text{ Ma}$)。原油向天然气转化的事实启示,深层天然气勘探要兼顾古油藏的研究。

关键词 松辽盆地 深层 天然气 碳同位素 烃源岩

第一作者简介 冯子辉 男 1964 年出生 博士研究生 高级工程师 有机地球化学

中图分类号 P593 **文献标识码** A

松辽盆地深层系指白垩纪泉头组二段以下地层^[1],主要包括下白垩统泉头组一、二段、登娄库组、营城组、沙河子组和上侏罗统火石岭组。20 世纪 80 年代以来,这套地层天然气勘探不断取得新发现,目前已成为大庆油田油气勘探重要的潜在领域之一。

长期以来,松辽盆地深层天然气勘探以寻找煤型气为主,相应地对天然气资源潜力的认识、油气成藏条件与分布规律的认识无不受煤型气的影响。但近几年的钻探表明,深层天然气不但有煤型气,而且有油型气和二者的混合气;部分天然气井中产出少量轻质油或凝析油,表明深层有油藏形成过程。这些发现为深层油气勘探提出了新的资源类型,因此有必要重新认识松辽盆地深层烃源岩的生烃条件,研究凝析油及油型气的有机地球化学特征和来源特征。

1 深层烃源岩形成的地质背景及生烃条件

松辽盆地深部地层形成于盆地演化早期的断陷阶段和断拗转换阶段,潜在的烃源岩包括下白垩统登娄库组、营城组、沙河子组和上侏罗统火石岭组。4 套烃源岩有机碳平均含量分别为 0.45% 、 0.85% 、 2.12% 、 0.50% ,指示沙河子组烃源岩具有最高的生烃潜力。有机质成熟度普遍较高,各层烃源岩 R_o 的平均值均大于 1.76% 。干酪根元素分析, H/C 原子比一般小于 1.0 ,

反映烃源岩的有机质类型基本为腐植型,主要成烃方向是煤型气,但这个推论需要考虑烃源岩较高成熟度的影响。沉积环境、古生物以及有机岩石学综合研究表明,深层各套烃源岩的有机质来源不同,反映它们具有不同的成烃方向。

以营城组、沙河子组和火石岭组为例,沉积环境与古生物化石研究表明(表 1),火石岭组烃源岩主要沉积于河流、三角洲相,暗色泥质岩分布范围小且厚度薄,厚度一般仅几米至十几米。主要生物化石为大孢子和银杏类、松柏类植物化石,有机质来源基本为陆源植物。沙河子组烃源岩沉积于湖泊、三角洲相,包括湖相沉积的暗色泥质岩和三角洲相沉积的煤层。烃源岩厚度 $30 \sim 350 \text{ m}$,最大厚度可达 485 m 。主要生物化石有孢粉、大孢子、沟鞭藻、蕨类植物、介形类、叶肢介、淡水双壳类等化石,反映沉积水体深度变化较大,有机质来源既有湖生生物,又有陆源植物。形成营城组烃源岩的湖泊、三角洲相仅在局部地区发育,烃源岩包括暗色泥质岩和煤层,厚度 $3 \sim 150 \text{ m}$,最大厚度可达 290 m 。生物化石主要有孢粉、大孢子、蕨类植物、叶肢介等化石,与沙河子组比较,典型的深水湖相化石减少,反映沉积水体深度变浅,有机质来源以陆源植物为主的特征。

各套烃源岩样品有机岩石学分析,进一步证实了有机质组成上的差异。火石岭组、营城组的煤系烃源

表1 深层烃源岩的沉积环境与化石组合特征

Table 1 The sedimentary environment and fossil assemblage for deep source rocks

烃源岩层	沉积环境	岩石类型	厚度/m	化石组合							有机质来源
				1	2	3	4	5	6	7	
营城组	湖泊、三角洲相	泥质岩、煤层	3~150		✓			✓	✓	✓	陆生为主
沙河子组	湖泊、三角洲相	泥质岩、煤层	30~350	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	湖生、陆生
火石岭组	河流、三角洲相	泥质岩	<20					✓	✓	✓	陆生

注:1-双壳类;2-叶肢介;3-介形类;4-沟鞭藻;5-大孢子;6-孢粉;7-植物

岩,有机质显微组分一般由镜质组(大于60%)、惰质组(大于20%)和少量壳质组(主要是孢子体,小于4%)组成,反映生物来源主要为陆源植物。沙河子组泥质烃源岩有机质显微组分主要由镜质组(小于25%)、腐泥组(小于20%,包括少量藻类体)、壳质组(小于20%)和惰质组(大于50%)组成,反映生物来源既有陆源植物又有湖相生物,其中三深2井沙河子组烃源岩(3 849.13 m)壳质组含量达76%,反映这套烃源岩具有生油生气的双重潜能^[2]。

2 凝析油的地球化学特征及其来源

松辽盆地深部储层样品在荧光显微镜下进行观察结果,砂岩的泥质胶结物及孔隙、裂隙中,普遍具有弱或较弱的荧光显示,部分井中(如升深1、芳深3、芳深5、卫深4等井)的登娄库组砂岩见中等强度的兰绿色、黄绿色或褐色荧光,表明深部储层中曾发生过相当规模的石油运移、聚集。目前在深层部分探井中见到的与天然气伴生的凝析油,即是对这一过程的客观反映。

松辽盆地深层芳深2井、升深1、宋3井等见到的凝析油一般为无色或浅黄色,相对密度小于0.8,粘度小于3 mPa·s。有机地球化学分析,这些原油可以分为2种类型。

原油的族组成和色谱分析(表2),第一类原油以芳深2、升深1为代表,特征为饱和烃含量高,芳烃和非烃含量低,反映成烃有机质脂类成分较多,属湖相烃源岩生成的常规凝析油;色谱分析,正烷烃组成低碳数成分多, C_{21} 前/ C_{22} 后大于27,奇偶优势不明显。第二类原油以宋3井为代表,特点是芳烃和非烃含量高,饱和烃含量相对偏低,反映成烃有机质芳烃和杂原子成分较多,可能属煤系烃源岩生成的凝析油;正

烷烃分布高碳数成分增加,且有弱的奇偶优势,反映成熟度相对偏低。

据国内外文献报道^[3,4,5],原油的单体烃碳同位素主要受生成母质性质的影响,因此这项参数为追索松辽盆地深层凝析油的成因提供了有效信息。深层凝析油单体烃碳同位素分析结果(图1),2类原油具有明显的差异。芳深2井原油碳数小于 nC_{24} 的正烷烃,单体烃碳同位素基本稳定在-31‰左右,略重于松辽盆地正常原油或与之接近,高于 nC_{25} 的正烷烃,单体烃碳同位素有变轻的趋势,反映凝析油的主体部分来自于湖泊相沉积的有机质;宋3井原油的单体烃碳同位素明显重于芳深2井原油,在相同碳数情况下一般重5‰以上。随碳数降低,宋3井原油表现出碳同位素逐渐变重的趋势,在 nC_{15} 达-23‰左右,具有三角洲相沉积、高等植物为主要生油母质的特征。

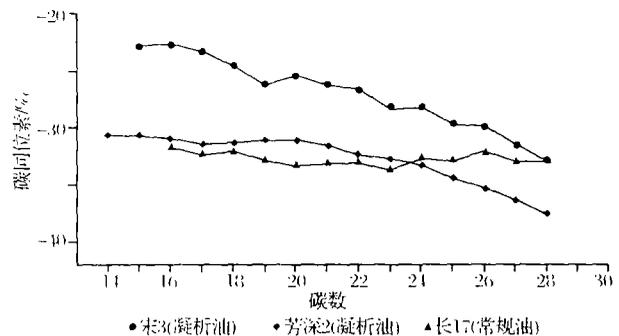


图1 松辽盆地深层凝析油单体烃碳同位素分布

Fig. 1 The carbon isotope of individual compounds for condensate in the deep reservoir of Songliao basin

深层凝析油的生物标志化合物分析,甾烷的异构化参数已达到演化的终点,不能指示原油的成熟程度,但从反映母源构成的甾烷分布中仍可见到两类凝析油的差别。宋3井原油甾烷分布上以 C_{29} 甾烷为优

表2 松辽盆地深层凝析油地球化学特征

Table 2 The geochemical characteristics of condensate in the deep reservoir of Songliao basin

井号	井深/m	油层	族组成/%			色谱分析			原油类型	
			饱和烃	芳烃	非烃	沥青质	OEP	C_{21} 前/ C_{22} 后		碳数范围
芳深2	2 768.8~3 038.4	登娄库	94.50	2.70	2.40	0.40	1.00	27.46	13~34	常规凝析油
升深1	2 645.2~2 824.2	登娄库	98.08	0.09	1.42	0.41	1.01	46.72	9~24	常规凝析油
宋3	2 649.0	沙河子	59.70	27.20	12.20	1.00	1.16	5.52	13~36	煤成凝析油

表 3 深层油型气组分及碳同位素数据

Table 3 The composition and carbon isotope of oil-type gas in the deep reservoir of Songliao basin

井号	井深/m	层位	组分碳同位素 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$				天然气组成/%				
			C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₁	C ₂₊	N ₂	CO ₂	H ₂
昌 103	2 929.4~2 920.6	D3	-51.3	-29.0	-27.9	-29.1	89.9	1.4	7.7	0.2	0.80
芳深 6	3 302~3 325.6	Yc	-50.5	-22.6	-28.9	-26.8	89.8	2.2	1.2	6.6	0.01
宋 3	2 321.4~2 310.2	Yc	-54.5	-34.9	-34.4	-34.5	81.7	14.6	2.0	0.4	0.00
升深 101	2 943~2 954.4	Hs1	-47.8	-35.6	-31.6		79.0	15.2	4.2	0.9	0.01
宋深 1	3 822.4~3 834.2	Sh2	-45.8	-29.1	-27.4	-29.1					

势,其中 $\alpha\alpha\alpha 20\text{R}-\text{C}_{27}/\text{C}_{29}$ 甾烷、 $\alpha\alpha\alpha 20\text{R}-\text{C}_{28}/\text{C}_{29}$ 甾烷均小于 0.51,代表成油母质以陆源有机质为主;芳深 2 井原油上述两个参数均大于 0.75,可能是湖生有机质对生油有重要贡献的反映。非常有趣的是利用生物标志参数进行油岩对比的结果(图 2),两类凝析油均来自于临井的沙河子组二段烃源岩,即反映沙河子组烃源岩成油类型的多样性,也表征断陷地层原油的运移距离可能不大。

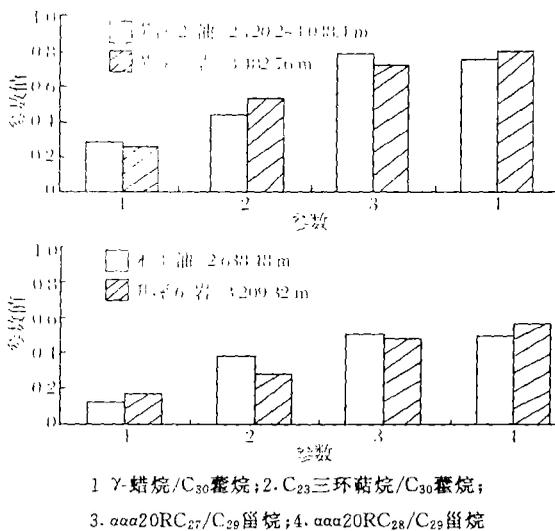


图 2 松辽盆地深层油岩生物标志化合物参数对比

Fig. 2 The correlation of oil-rock biomarker parameters in the deep formation of Songliao basin

3 油型气的地球化学特征与来源

松辽盆地油型气与煤型气的甲烷碳同位素分界限大约为 $-38\text{‰} \sim -40\text{‰}$ ^[1],因此可以把甲烷碳同位素小于 -40‰ 的深层天然气作为油型气。代表井有芳深 6、升深 101、宋 3、宋深 1 和昌 103 井等,油型气一般分布于下部储层,如营城组、沙河子组或火石岭组,气藏埋深大于 2 300 m。天然气的主要地球化学特征如下(表 3)。

深层油型气的组成分析,甲烷含量一般在 80%~90% 之间,低于盆地典型煤型气的甲烷含量^[1],乙烷以上重烃含量变化较大,最高达 15.2%,反映油型气具有甲烷含量低、重烃含量高的一般特征。氮气和二氧化

碳气含量较低,一般不超过 8%。值得说明的是氢气含量一般较低,但部分天然气中,如昌 103 井氢气含量达 0.8%,反映有机质在裂解成气过程中“氢”源相对丰富。

深层油型气组分碳同位素分析,甲烷碳同位素范围值 $-45\text{‰} \sim -55\text{‰}$,具有典型的油型气特征。但值得说明的是,按烃源岩生成的油型气一般 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 R_o 的关系推算^[6],其烃源岩的成熟度 R_o 小于 1.0%,与目前深层烃源岩实际成熟度相差甚远,因此深层烃源岩直接作为油型气的主要贡献者可能性不大。从甲烷同系物的碳同位素看,深层油型气尽管甲烷碳同位素轻,但乙烷和丙烷的碳同位素却相对较重,乙烷与甲烷碳同位素的差值在 12‰~22‰ 之间,反映两者之间存在显著的碳同位素分馏作用。笔者^[7]曾对松辽盆地深层原油在储层介质条件下开展了加水热模拟实验,实验表明原油裂解气的甲烷碳同位素轻,如高成熟条件下 ($R_o:1.3\% \sim 1.8\%$) $\delta^{13}\text{C}_1$ 小于 -48‰ ,乙烷与甲烷碳同位素分馏明显,最高达 13‰。原油热模拟气与深层油型气特征的相似性表明,松辽盆地深层油型气可能是原油在高成熟或过成熟阶段裂解成气的结果。

油型气分布层位一般与生油层同层或近临生油层,间接反映古油藏形成时原油的运移距离可能不大。但位于下部储层的油型气向上部储层运移,可以与其中的煤型气形成混合气。以升平气田为例(表 4),从天然气组分碳同位素看,气田底部火石岭组和沙河子组气层的天然气为油型气,气田顶部登娄库组三段气层的天然气为煤型气,两类天然气组分碳同位素均为正碳同位素系列,在层位或埋深上处于两者之间的天然气碳同位素系列发生倒转,原因可能是煤型气与油型气混合的反映。其中非常巧合的是,从下至上混合气的甲烷、乙烷和丙烷碳同位素均呈现变重的趋势,反映油型气的混合比例逐渐减少、煤型气的混合比例逐渐增加,显然油型气与煤型气混合可能是深层天然气碳同位素系列发生倒转的重要原因之一。

表4 升平气田天然气组分碳同位素数据
Table 4 The carbon isotope of natural gas in Shengping gas field

井号	井深/m	层位	天然气组分碳同位素 $\delta^{13}\text{C}/\%$				系列特征
			C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	
升深1	2 645.2~2 737.4	D3	-27.82	-24.92	-24.70	-23.59	正碳系列
升深4	2 743~2 752	D3	-26.82	-27.80	-31.61	-31.66	倒转系列
升深4	2 797~2 801	D3	-27.30	-28.60	-33.68	-33.44	倒转系列
升深2	2 880~2 904	D2	-29.44	-30.18	-34.77	-31.47	倒转系列
升深4	3 054~3 073	Yc	-30.49	-36.56	-36.60	-38.50	倒转系列
升深101	2 943~2 954.4	Hs1	-47.78	-35.62	-31.62		正碳系列
宋深1	3 822.4~3 834.2	Sh2	-45.83	-29.09	-27.40	-29.05	正碳系列

4 储层固体沥青的地球化学特征与油型气的形成过程

岩石中固体沥青的形成可能有两种途径,一是与运移、聚集的原油裂解有关,属于次生成因;二是与岩石中富氢有机质的沥青化作用有关,属原生成因。松辽盆地深部储层中见到的固体沥青属于第一种成因,以徐深1井营城组火山岩储层为例,岩心观察发现,在3 348.73 m、3 526.3 m、3 633.05 m深度段的火山岩裂隙、孔洞中填充了黑色的线状沥青脉或块状沥青,由于火山岩中没有富氢有机质向沥青转化,因此固体沥青属异地运移来的原油热裂解后残留的产物。

徐深1井固体沥青的有机地球化学分析,有机碳含量0.08%~0.16%,生烃潜量0.38~1.81 mg/g,氢指数49~297 mg/g,反映目前这些固体沥青或原油热裂解后的残余物进一步成烃潜力较小。固体沥青样品(井深3 348.73 m)实测反射率 BR_0 为2.22%,考虑到与镜质体反射率的差别,根据Jacob^[8]提出的沥青反射率与镜质体反射率换算公式进行计算,得到的镜质体反射率 R_0 大约为1.87%。表明原油裂解向天然气和

固体沥青转化主要发生高成熟阶段的晚期。

松辽盆地北部深层地层埋藏史和成熟史研究表明(图3),深部地层大概经历了早期埋藏—抬升动荡、中期持续埋藏、晚期稳定三个阶段,埋藏史与大地热流共同影响地层的热成熟史。以沙河子组(K_1sh)、营城组(K_1yc)热成熟史为例,油型气的形成大概经历了以下两个阶段:泉头组二段—青山口组沉积末(110~90 Ma),沙河子烃源岩进入成熟生油阶段(R_0 0.75%~1.3%),此时烃源岩排出的原油进入邻近储层,如营城组储层形成油藏,原油伴生的天然气由于缺少区域盖层保存条件而大部分散失(青山口组泥岩刚刚沉积),因此现今深部储层中难以见到烃源岩生成的原生油型气。嫩江组—明水组沉积末(80~65 Ma),营城组储层进入高成熟阶段晚期(R_0 1.75%~2.0%),其中的原油开始大量向天然气转化,此时区域盖层均已形成,为天然气成藏提供了有利条件,因此深层天然气的勘探要兼顾对古油藏的研究。需要说明的是由于主要烃源岩—沙河子组高成熟演化早于营城组,一般煤型气的生成可能略先于原油裂解气,从而导致煤型气在上、油型气在下的分布格局。

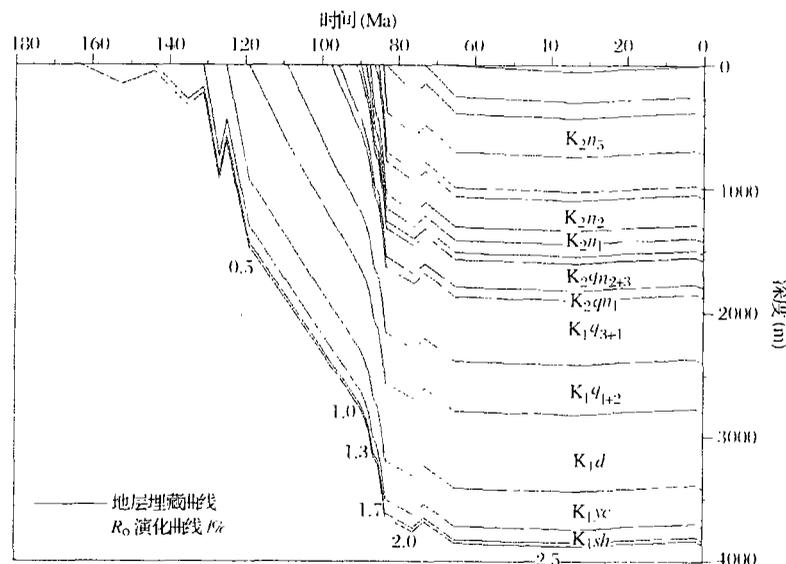


图3 松辽盆地深层地层埋藏史及热成熟史

Fig. 3 Burial history and thermal mature history of deep formation of the Songliao basin

5 结论

(1) 松辽盆地深部各套烃源岩的沉积环境、古生物化石及有机岩石学研究表明,这些烃源岩的有机质来源不同,具有不同的成烃方向。

(2) 深层凝析油包括煤系烃源岩生成的煤成凝析油和湖相泥质烃源岩生成的常规凝析油。两者在化合物组成以及碳同位素分布上存在明显差异,但均来自于沙河子组烃源岩。

(3) 深层油型气具有甲烷含量低、重烃含量的一般特征,天然气甲烷碳同位素轻,组分碳同位素分馏明显,主要为原油裂解成因。油型气与煤型气混合可能是造成深层天然气碳同位素倒转的重要原因。

(4) 储层中次生成因固体沥青的发现,进一步证实了储层中原油向天然气的转化过程,原油向天然气转化主要发生在高成熟阶段的晚期,对应的地质年代大约在嫩江组—明水组沉积末(80~65 Ma)。

参考文献(References)

- 1 高瑞祺,蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律. 北京:石油工业出版社,1997
- 2 金奎励主编. 有机岩石学研究—以塔里木为例. 北京:地震出版社,1997
- 3 赵孟军,黄第藩,张水昌. 原油单体烃类的碳同位素组成研究. 石油勘探与开发,1994,21(3):52~59
- 4 Wilhelms A, Larter R S, Hall K. A comparative study of the stable carbon isotopic composition of crude oil alkanes and associated crude oil asphaltene pyrolysate alkanes. *Organic Geochemistry*, 1994, 21(6/7):751~759
- 5 张文正,裴戈,关德师. 鄂尔多斯盆地古、中生界原油轻烃单体系列同位素研究. 科学通报,1992,37(3):248~251
- 6 戴金星. 天然气地质和地球化学论文集(卷一). 北京:石油工业出版社,1998. 231~238
- 7 冯子辉,迟元林,杜洪文,等. 原油在储层介质中的加水裂解生气模拟实验. 沉积学报,2002,20(3):505~510
- 8 Jacob H. Disperse solid bitumens as an indicators for migration and maturity in prospecting for oil and gas. *Erdol und Kohle*, 1985,38:364~366

The Origin of Condensate and Oil-type Gas from Deep Reservoir in the North of Songliao Basin

FENG Zi-hui^{1,2} FENG Zhi-qiang² LIU Wei² WANG Xue² GUAN Qiu-hua²

1(Jilin university, Changchun 130061)

2(Research institute of exploration and development, Daqing LTD, Daqing 163712)

Abstract The discovery of condensate and oil-type gas from deep reservoir increased the exploring potential of petroleum in the north of Songliao basin. Applying the analytical technologies of biomarker and carbon isotope of individual compounds, combining with geological background, the geochemical characteristics of condensate, oil-type gas and solid bitumen was discussed. The condensate was generated from coals and coal-measure source rocks in deep formation of the basin. The former is characterized by high content of aromatic hydrocarbon and heavy carbon isotope of individual compounds. The latter is characterized by high content of saturated hydrocarbon and light carbon isotope of individual compounds. However, the result of correlating biomarker indicates that the both condensate are derived from the same source rock-Shahezi formation. The carbon isotope of methane of oil-type gas is light, generally less than -45% . The difference of carbon isotope between methane and ethane is obvious belonging to natural gas from oil cracking. The mixture of oil-type gas and coal-type gas in deep reservoir may be the one major reason of reverse in hydrocarbon carbon isotope series of deep natural gas. The TOC is $0.08\% \sim 0.16\%$, the HI is $49 \sim 297$ mg/g, R_o is about 1.87% for the solid bitumen in deep volcanic reservoir. It shows that potential of generating hydrocarbon of the solid bitumen is low nowadays, oil was cracked to natural gas during the later period of high mature stage, corresponding geologic age is about the sedimentary time between the Nenjiang formation and Mingshui formation (80~65 Ma). The fact of oil transforms into natural gas enlightens that the exploration of deep natural gas should put the study of pero-reservoir into consideration.

Key words Songliao basin, deep formation, natural gas, carbon isotope, source rocks