

# 辽河坳陷滩海东部地区天然气地球化学特征 及有机热成因-无机成因双源模式

胡英杰, 刘兴周, 黄双泉, 蔡国钢, 王廷山, 李金有, 杨光达, 侯拓, 张东伟

中国石油辽河油田公司

**摘要** 辽河坳陷滩海东部地区葵探1井获得天然气重大突破,其侏罗系、古近系天然气的甲烷碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}_1$ )差异大,确定天然气成因与气源岩对于评价天然气资源潜力及选择勘探目标具有重要意义。系统分析了滩海东部地区古近系东营组、沙河街组三段和侏罗系小东沟组3套含气层系的天然气组分、稳定碳同位素组成等地球化学特征,对天然气成因和来源进行探讨。滩海东部地区发育有机热成因气和无机成因气2种类型:①古近系东营组和沙三段天然气为煤型有机热成因气,成分以甲烷为主,干燥系数介于0.789~0.949, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值主要在-35‰左右。主要气源岩为盖州滩洼陷沙三中下亚段泥岩, $R_o$ 在0.77%~1.59%之间。中浅层东营组天然气成熟度显著高于同深度泥岩,表明天然气来源于深部地层;而深层沙河街组三段天然气成熟度与同深度泥岩差异不大,表明天然气以原地聚集为主。②侏罗系小东沟组天然气为无机成因气,干燥系数平均值为0.991, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值>-20‰;推测东营末期深大断裂大规模走滑活动沟通地壳深部与地幔,费托合成的无机天然气沿断裂带运聚成藏。盖州滩洼陷沙三段成熟烃源岩分布区与营口—佟二堡走滑断裂带是分别探索有机热成因型与无机成因型天然气的有利目标区带。

**关键词** 碳同位素; 气体组分; 热成因气; 无机成因气; 费托合成; 滩海东部地区; 辽河坳陷

**中图分类号**:TE122.1 **文献标识码**:A

**引用**: 胡英杰, 刘兴周, 黄双泉, 等. 辽河坳陷滩海东部地区天然气地球化学特征及有机热成因-无机成因双源模式[J]. 海相油气地质, 2024, 29(1): 81-89.

HU Yingjie, LIU Xingzhou, HUANG Shuangquan, et al. Geochemical characteristics of natural gas and dual-source pattern of thermogenic gas and inorganic gas in the eastern offshore of Liaohe Depression [J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(1): 81-89.

## 0 前言

辽河坳陷滩海东部地区古近系深断陷型凹陷地层厚度巨大,具有良好的天然气勘探前景。随着渤海湾盆地渤中19-6大型气田的发现<sup>[1]</sup>,古近系深层天然气勘探逐渐受到重视。根据辽河油田公司资源评价的结果,滩海东部地区天然气剩余资源量近千亿方<sup>[2]</sup>。2007年,葵花18井区东营组上报探明天然气储量 $8.6\times 10^8\text{ m}^3$ 。2022年10月14日,滩海东部葵花岛构造风险勘探获得重大发现,葵探1井在新生界古近系东营组、沙河街组及中生界侏罗系小东沟组均获得日产超 $10\times 10^4\text{ m}^3$ 天然气,落实预测储量 $505.94\times 10^8\text{ m}^3$ <sup>[2]</sup>,证实滩海地区东部天然气资源潜力巨大。

葵探1井的突破,其重要性不仅体现在巨大的产

气量和增储规模,还在于发现了异常重甲烷碳同位素的天然气<sup>[2]</sup>,表明除有机热成因之外,无机成因气可能有重要贡献。国内典型含气盆地一般以热成因气为主,无机成因的无机气一般主要表现为 $\text{CO}_2$ 气藏<sup>[3-4]</sup>,烷烃气藏少见。滩海东部地区属于辽河坳陷东部凹陷向海延伸部分,一般认为天然气主要成因类型为偏腐殖型有机成因湿气或气源岩不同演化阶段的混源气<sup>[5]</sup>,整体成熟度不高。近年来,在沉积盆地内以热成因气为主的气藏中发现无机成因气后,关于有机-无机复合供气的专项研究逐渐增多<sup>[6-7]</sup>。本文基于滩海东部地区系统的天然气地球化学特征分析,结合研究区构造位置、断裂特征,提出了有机热成因气-无机成因气的双源供气模式,为滩海地区大规模天然气勘探指出了新的方向。

收稿日期:2023-08-07; 改回日期:2023-10-11; 网络出版日期:2024-03-05

本文受中国石油油气与新能源分公司重大科技专项“辽河油田探区‘十四五’油气资源评价”(编号:2023YQX20104)及辽河油田重大科技专项“辽河坳陷深层生烃动力学与天然气资源潜力评价”(编号:2021KJZX-02-02)联合资助

**第一作者**: 胡英杰,教授级高级工程师,主要从事油气勘探和储量研究。通信地址:124010 辽宁省盘锦市兴隆台区石油大街95号;E-mail: huyj@petrochina.com.cn

**通信作者**: 黄双泉,高级工程师,主要从事油气地球化学和油气资源评价研究。通信地址:124010 辽宁省盘锦市兴隆台区石油大街95号;E-mail: huangsq01@petrochina.com.cn

## 1 地质背景

辽河拗陷主体由NE向延展的西部凸起、西部凹陷、中央凸起、东部凹陷及东部凸起组成(图1a)。区内中生界断裂主要走向与郯庐断裂北段分支一致,呈北东向展布,具有西倾或西北倾的特征。新生界断裂主要包括古近纪裂陷期的盆缘同向生长派生断层,以及新近纪拗陷期的近东西向雁列式或花状控圈小断层。营口—佟二堡断裂为东部凹陷的主控断层(图1a),属于郯庐断裂带北段分支,其现今面貌是早期拉张变形、后期走滑变形的结果<sup>[8]</sup>;燕山中期左旋伸展拉张导致断裂发生张扭性负反转,伴随了强烈的火山活动;新生代转换为右旋走

滑,主位移带位于东部凹陷东缘,作为基底主走滑断裂剖面上呈直立产状,以两侧垂直变形为主,走向上部受挤压应力作用部位形成褶皱或逆断层,北部受伸展应力作用部位形成正断层。

滩海东部地区地理位置上位于辽宁省盘锦市大洼区荣兴屯南部的滩涂、5 m极浅海水域,构造上是辽河拗陷东部凹陷向海域的自然延伸,包括月海斜坡带、盖州滩洼陷带、太阳岛—葵花岛断裂推覆带、燕南潜山带等三级构造单元(图1a)。区内地层自下而上包括:侏罗系,白垩系,古近系沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组,及第四系。主要含气层系包括古近系东营组、沙河街组三段(简称沙三段)、侏罗系小东沟组<sup>[9]</sup>(图1b)。

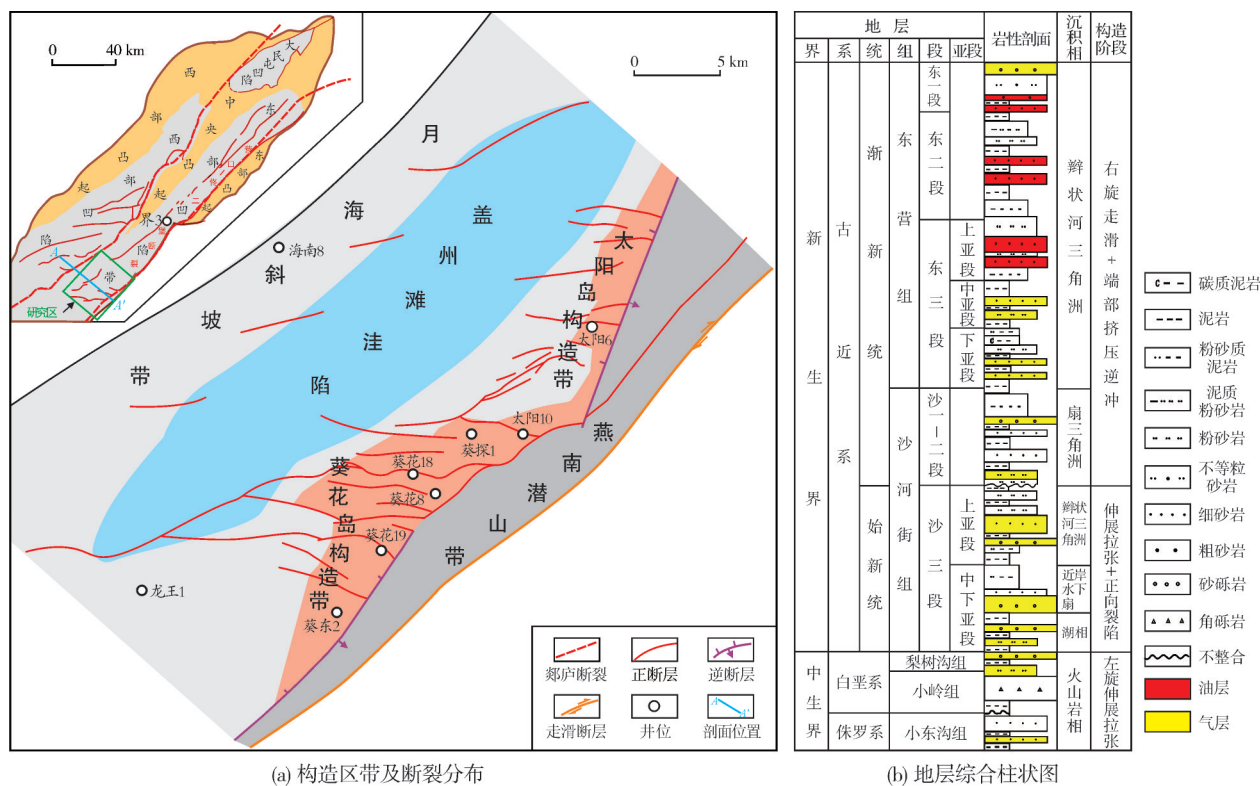


图1 辽河拗陷滩海东部地区构造简图及地层柱状图

Fig. 1 Structural sketch map and stratigraphic column of the eastern offshore, Liaohe Depression

勘探与研究表明,区内主要烃源岩层系为沙三段中下亚段,烃源岩主要发育于盖州滩洼陷,埋深最大超过8 000 m,厚度在1 000~3 000 m之间,面积超过1 000 km<sup>2</sup>。该套烃源岩的主要有机质类型为Ⅱ<sub>2</sub>型,TOC平均值超过2.0%,生烃潜力均值为8 mg/g,整体评价为好—优质源岩;镜质组反射率 $R_o$ 在0.7%~3.0%之间,处于湿气—干气期。天然气充注期包括

东营末期、馆陶期—明化镇期,区内沙三段天然气为晚期以成熟气为主的混合气,东营组天然气为早期低熟气和晚期成熟气的混合气。

## 2 样品与实验

共采集滩海东部地区天然气样品20个,主要来自太阳6井、太阳10井、葵探1井、葵花18井等6口

井,其中9个样品为钻井过程中实时岩屑罐顶气,11个样品为试油时气瓶取样气。葵探1井数据为新测试结果,其余均为以往测试数据。

葵探1井天然气组分测定采用气相色谱法,测试仪器为美国Agilent 6890N。检测条件:100℃十通阀进样,载气为氦气,1 mL定量管;恒温50℃不锈钢填充柱,保留40 min;双热导池检测器,温度均为200℃。

葵探1井天然气碳同位素检测采用Trace GC-ISOLINK-MAT 253 IRMS气相色谱-氧化系统-稳定同位素质谱仪。气相色谱条件:色谱柱HP-PLOT Q,载气为氦气;进样口温度为200℃,按10:1分流比进样;程序升温40℃,保留6 min,以15℃/min升至80℃,再以5℃/min升至200℃,保留5 min;IOSLINK条件为1000℃氧化反应管温度;质谱分析条件为EI离子源,70 eV电能,质量范围为1~150 dalton(分子质量单位, $^{12}\text{C}$ 原子质量的1/12),真空度 $<1.0\times 10^{-7}$  mbar(1 mbar=100 Pa),样品分析真空度为 $2.0\times 10^{-6}$  mbar。

氦气同位素为早期数据,由中国科学院兰州地质研究所完成,采用英国VG公司的VG5400质谱计进行分析,以空气氦为标样,采用同位素峰高比测定法,测定方法及流程见文献<sup>[10]</sup>。

### 3 天然气地球化学特征

#### 3.1 天然气组分特征

从葵探1井样品检测结果(表1)来看,天然气组分受到取样过程影响。由于灌顶气是岩屑解吸气与空气的混合物,因此灌顶气样的 $\text{N}_2$ 含量明显要高于气瓶气。按气瓶气样统计(表1):烃类气体以甲烷为主,含量为76.87%~98.39%,重烃( $\text{C}_{2+}$ )气体含量差异大,其中乙烷含量为0.24%~10.08%,丙烷含量为0.01%~3.84%;非烃气体以 $\text{N}_2$ 为主,含量为0~10.23%,含少量 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ 和微量He,不含 $\text{H}_2\text{S}$ 。至于天然气干燥系数( $\text{C}_1/\sum \text{C}_{1-5}$ ),古近系东营组、沙河街组在0.789~0.949之间,具有湿气及向干气过渡的特征,而侏罗系小东沟组大于0.98,平均值为0.991,为典型干气。

#### 3.2 碳同位素特征

##### 3.2.1 烷烃碳同位素

从滩海东部地区气样的同位素测定数据(表1)来看,碳同位素组成受热演化程度的影响与深

度呈正相关,不同层系的甲烷和乙烷碳同位素组成有较大差异:①东营组天然气主要分布在3500 m以浅,以太阳6井、太阳10井、葵花8井、葵花18为代表。甲烷碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}_1$ )偏负,主体分布在-41.8‰~-34.4‰之间,平均值为-37.6‰,显示成熟度不高;乙烷碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}_2$ )分布在-28.7‰~-23.9‰之间,平均值为-26.2‰; $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$ 和 $\delta^{13}\text{C}_4$ 大体呈正序列,即 $\delta^{13}\text{C}_1<\delta^{13}\text{C}_2<\delta^{13}\text{C}_3<\delta^{13}\text{C}_4$ (图2)。②葵探1井沙三段天然气主要分布在4000~5500 m。 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值偏重,分布在-32.7‰~-27.3‰之间,平均值为-31.0‰,显示成熟度比东营组高; $\delta^{13}\text{C}_2$ 值分布在-29.1‰~-19.7‰之间,平均值为-23.5‰; $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$ 和 $\delta^{13}\text{C}_4$ 大体呈正序列(图2)。③葵探1井小东沟组天然气分布在5500 m以深。 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值异常重,分布在-19.8‰~-14.8‰之间,平均值为-17.0‰;仅一个样品的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值为-28.1‰; $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 呈反序列特征(图2),即 $\delta^{13}\text{C}_1>\delta^{13}\text{C}_2$ 。

##### 3.2.2 $\text{CO}_2$ 碳同位素

$\text{CO}_2$ 作为天然气中除烷烃气外最为常见的组分之一,其含量及碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ )常用于确定天然气成因。一般认为:热成因气的 $\text{CO}_2$ 含量低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值小于-10‰;无机成因气的 $\text{CO}_2$ 含量普遍高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值大于-9‰。美国科罗拉多矿业学院的Milkov统计全球20000多个样品发现,无机成因气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值分布在-40‰~2‰之间,热成因气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值分布在-40‰~10‰之间,两类的数据分布区间重叠<sup>[11]</sup>。辽河坳陷滩海东部地区东营组、沙三段及小东沟组的 $\text{CO}_2$ 含量在0.07%~1.33%之间(表1),整体偏低。研究区中新生界 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值差异较大:沙三段在-14.6‰~-6.9‰之间,平均值为-12.1‰;小东沟组在-30.7‰~-23.8‰之间,平均值为-26.8‰,较沙三段明显偏轻。

综合来看,葵探1井沙三段与小东沟组天然气地球化学特征具有明显的差异(表1,图2):天然气干燥系数——沙三段小于0.95,小东沟组大于0.98;烷烃碳同位素——沙三段呈正序列, $\delta^{13}\text{C}_1$ 平均值为-31.0‰,而小东沟组呈反序列, $\delta^{13}\text{C}_1$ 平均值为-17.0‰; $\text{CO}_2$ 碳同位素——沙三段平均值为-12.1‰,小东沟组平均值为-26.8‰。这反映出古近系与侏罗系的成藏体系分隔性明显,完全没有沟通。

表1 辽河坳陷滩海东部地区天然气地球化学数据表  
Table 1 Geochemical data of natural gas in the eastern offshore of Liaohc Depression

井号	深度/m	层位	组分含量/%										干燥系数 (C <sub>1</sub> /ΣC <sub>1-5</sub> )	碳同位素组成(δ <sup>13</sup> C <sub>carb</sub> )/‰						R/Ra	备注
			CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	iC <sub>4</sub>	nC <sub>4</sub>	iC <sub>5</sub>	nC <sub>5</sub>	N <sub>2</sub>	He	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	iC <sub>4</sub>	nC <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>		
葵花 18	2 316.0~2 349.9	古近系 东二段	87.29	3.56	0.56	0.10	0.03	0	0	5.54	0.004 3	0.01	0.46	-35.5	-23.9	-22.3	-23.9	-19.4		0.13	气瓶气
	3 507.3~3 526.4		79.19	3.65	1.04	0.22	0.12	0	0	10.23	0.002 4	0.07	1.33	-30.3	-25.2	-23.3	-24.5	-21.1		0.15	气瓶气
葵花 19	2 192.3~2 218.2	古近系 东二段	90.03	3.91	1.57	0.59	0.55	0	0	1.09	0.004 5	0.01	0.21	-41.8	-27.4	-24.2	-26.7	-23.3		0.13	气瓶气
葵花 8	2 417.0~2 426.0	古近系 东二段	84.13	10.08	3.84	0.61	0.52	0.09	0.03	0	0	0.19	0.51	-35.8	-26.6	-24.5	-25.3				气瓶气
太阳 10	2 111.3~2 118.2	古近系 东二段	87.19	5.03	2.17	0.72	0.75	0	0	0.65	0.003 6	0.02	0.25	-39.0	-27.0	-24.8	-26.4	-24.2		0.16	气瓶气
	2 513.7~2 528.2		88.88	5.34	1.83	0.46	0.32	0	0	1.75	0.004 5	0	0.57	-36.1	-26.3	-24.8	-26.6	-23.9		0.17	气瓶气
太阳 6	2 811.2~2 825.0	古近系 东三段	90.96	4.27	1.38	0.43	0.39	0	0	1.29	0.004 3	0.16	0.07	-34.4	-24.5	-23.8	-25.2	-23.4		0.19	气瓶气
	3 497.2~3 517.1		76.87	8.35	6.20	2.65	2.15	0	0	1.11	0.002 0	0.47	0.12	-38.6	-28.7	-27.9	-29.2	-27.1		0.17	气瓶气
葵探 1	3 616.3~3 767.0	古近系 东三段	86.05	8.24	3.56	0.70	0.68	0.14	0.08	0.47	0	0	0								气瓶气
	4 123.55	古近系 沙三 上亚段	94.23	3.98	0.88	0.16	0.06	0.02	0	0	0	0.62	0	-31.1	-19.7	-17.0	-20.6	-17.1	-14.6		罐顶气
	4 294.35		78.35	7.36	3.21	0.58	0.58	0.14	0.09	9.36	0	0.34	0	-32.7	-24.4	-21.6	-24.3	-19.7	-11.6		罐顶气
	4 380.26		57.60	5.37	1.82	0.32	0.29	0.05	0.03	33.89	0	0.63	0	-31.8	-21.5	-18.2	-22.0	-12.4	-13.3		罐顶气
	4 466.4	古近系 沙三 中下亚段	14.66	1.56	0.70	0.11	0.11	0	0	82.38	0	0.49	0	-31.3	-24.3	-19.0			-12.2		罐顶气
	4 552.7		46.56	3.41	1.18	0.17	0.13	0	0	47.23	0	0.37	0.94	-32.0	-24.9	-20.6	-23.2	-18.0	-13.8		罐顶气
	4 540.0~4 775.0		81.29	9.44	3.43	0	0	0	0	1.02	0	0	0	-30.6	-29.1	-24.9	-26.4	-23.7	-6.9		气瓶气
	4 719.59	侏罗系 小东沟组	38.50	2.98	0.86	0.13	0.13	0	0	55.27	0	0.86	1.26	-27.3	-20.9	-18.4	-20.4	-14.6	-12.4		罐顶气
	5 785.11		7.77	0	0	0	0	0	0	91.25	0	0.97	0	-14.8					-30.7		罐顶气
	5 658.0~5 835.0		98.39	0.24	0.01	0	0	0	0	1.18	0	0	0.15	-19.8	-28.1						气瓶气
	5 799.0		14.00	0.06	0	0	0	0	0	84.41	0	1.52	0	-16.6					-23.8		罐顶气
	5 819.0		16.37	0.05	0	0	0.24	0	0	81.29	0	0.73	1.03	-16.8					-25.8		罐顶气

注: R、Ra 分别为气样和大气的 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He, 常用 R/Ra 值分析氦气来源。



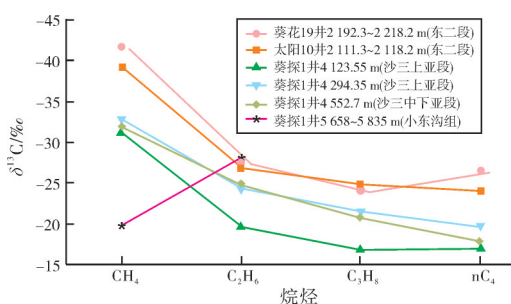


图2 辽河拗陷滩海东部地区天然气烷烃碳同位素组成折线图

Fig. 2 Line chart of carbon isotope composition of alkanes in the eastern offshore of Liaohe Depression

## 4 天然气成因

天然气包括有机成因气和无机成因气2种成因

类型。有机成因气以有机热成因气为主。无机成因气在国内外多有发现<sup>[12]</sup>。将辽河拗陷滩海东部地区的样品分析数据投到 Milkov 图版<sup>[11]</sup> (图 3a, 3b), 基于  $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  及  $\delta^{13}\text{C}_1$ -烃类组分关系, 可以判定古近系东营组、沙三段天然气为有机热成因气, 侏罗系小东沟组天然气为无机成因气。

### 4.1 有机热成因气

东营组、沙三段有机热成因气样品中, 乙烷碳同位素组成基本  $> -28\text{‰}$  (图 4a), 据此可认定为煤成气 (图版中处于过渡或混合气区的, 随主体考虑), 这表明研究区有机热成因天然气主要来源单一, 主要来自偏腐殖型气源岩。古近系东营组、沙三段天然气来自沙三段中下亚段烃源岩, 持续充注成藏。

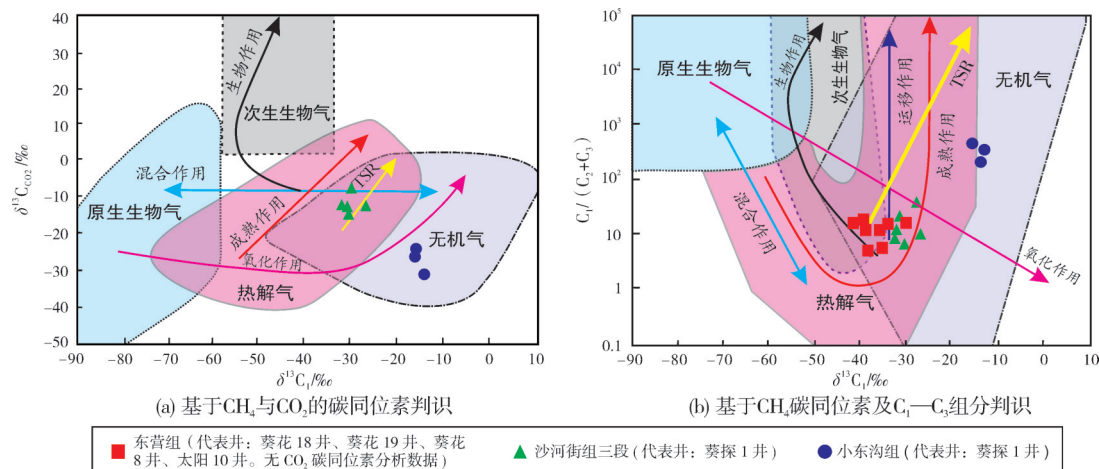


图3 辽河拗陷滩海东部地区天然气成因类型综合判别图 (图版据文献[11])

Fig. 3 Comprehensive discrimination diagrams of natural gas genesis types in the eastern offshore of Liaohe Depression (chart cited from reference [11])

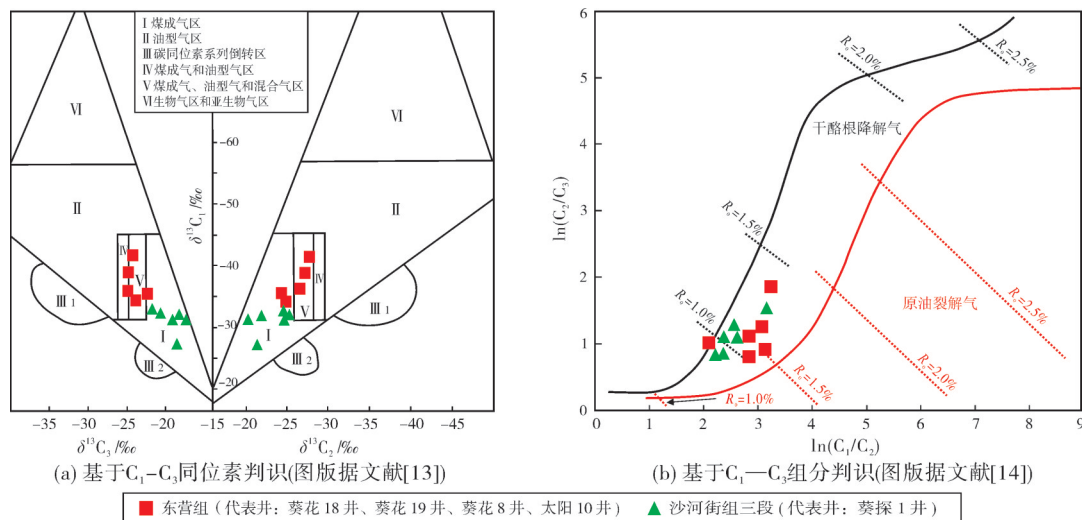


图4 辽河拗陷滩海东部地区有机热成因天然气类型综合判别图 (图版分别引自文献[13]、[14])

Fig. 4 Comprehensive discrimination diagram of organic thermogenic natural gas types in the eastern offshore of Liaohe Depression (chart cited from reference [13] and [14] respectively)

甲烷碳同位素是气源岩成熟度的敏感指标。同一母质类型的气源岩生成的热成因气,其 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与气源岩的 $\lg R_o$ 呈线性关系<sup>[15-16]</sup>。针对研究区东营组、沙河街组煤型气,应用刘文汇经验公式<sup>[16]</sup>的计算结果显示:天然气成熟度(气源岩 $R_o$ )主体分布在0.77%~1.59%之间(表2);浅层天然气(4 200 m以浅)中,太阳6井3 497.2~3 517.1 m井段天然气成熟度为0.81%,与同深度的泥岩成熟度( $R_o$ 为0.8%)相当,推测为早期自生自储,其他的天然气成熟度均比对应深度的泥岩高,这反映出天然气以从深部运移至浅层成藏为主;深层天然气的成熟度与对应深度的泥岩基本相当或略高,反映出天然气以原地聚集或近距离运移为主。

谢增业等<sup>[14]</sup>依据天然气组分数据建立了天然气成因类型判别图版(图4b)。该图版不仅可用来区分干酪根降解气、原油裂解气,而且对不同成因类型天然气的成熟度反映效果良好<sup>[17-18]</sup>。将辽河滩海东部地区样品数据投到该图版,可见天然气为干酪根降解气,其 $R_o$ 在0.9%~1.4%之间,这与表2中应用刘文汇经验公式的计算结果差异不大。

表2 辽河坳陷滩海东部地区古近系天然气  
气源岩成熟度计算表

Table 2 Calculation of natural gas maturity in the eastern offshore  
of Liaohe Depression

井号	深度/m	泥岩 $R_o$ / %	层位	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} /$ ‰	气源岩 $R_o$ / %
葵探18	2 316.0~2 349.9	0.35	东二段	-35.5	0.93
	3 507.3~3 526.4	0.80	东三段	-30.3	1.59
葵探8	2 417.0~2 426.0	0.40	东二段	-35.8	0.90
	1 847.8~1 885.9	0.20	东二段	-39.6	0.77
太阳10	2 111.3~2 118.2	0.30	东二段	-39.0	0.79
	2 513.7~2 528.2	0.45	东三段	-36.1	0.91
太阳6	2 811.2~2 825.0	0.60	东三段	-34.4	1.04
	3 497.2~3 517.1	0.80		-38.6	0.81
	4 123.55	1.00		-31.1	1.46
葵探1	4 294.35	1.10	沙三 上亚段	-32.7	1.24
	4 380.26	1.25	沙三中 下亚段	-31.8	1.36
	4 466.4	1.30		-31.3	1.43
	4 552.7	1.50		-32.0	1.33
	4 540.0~4 775.0	1.70		-30.5	1.55

注:气源岩 $R_o$ 计算公式: $\delta^{13}\text{C}_1=22.42\lg R_o-34.8$  ( $R_o\geq 0.9\%$ ),  
 $\delta^{13}\text{C}_1=48.77\lg R_o-34.1$  ( $R_o<0.9\%$ ), 据文献<sup>[16]</sup>。

## 4.2 无机成因气

辽河坳陷滩海地区侏罗系小东沟组天然气的

甲烷碳同位素组成具有异常重的特征,最重的达-14.8‰(表1,葵探1井),干燥系数为0.99左右,与干气近似。具有类似特征的气藏,如松辽盆地徐家围子昌德气藏,已被证实为典型的无机成因气藏<sup>[4]</sup>。全球其他地区也有无机成因甲烷聚集的案例,如现今北冰洋 Vestnesa 海脊<sup>[19]</sup>和冲绳海槽中部 Izena 地洞<sup>[20]</sup>热液气体中的甲烷被证实来自于壳幔系统,欧洲北部 Fennoscandian 地盾前寒武系埋深2 500 m的甲烷证实是以无机作用为主<sup>[21]</sup>。

关于无机甲烷的成因,与低分子量化合物聚合作用有关的地幔脱气和与费托反应有关的蛇纹石化作用是主流认识<sup>[22-23]</sup>。地幔脱气成因说认为天然气形成于深部含碳物质,在地幔内部的高温高压下,甲烷分子脱气后呈热力学平衡状态。渤海湾盆地郯庐断裂带的天然气赋存被认为是地幔脱气作用最典型的代表<sup>[24]</sup>。费托合成是指在一定温压条件下,通过特定金属(Ni、Co、Cr等)的催化作用,CO和 $\text{H}_2$ 反应合成烃类,这是陨石中甲烷的成因机制<sup>[25]</sup>。松辽盆地昌德气藏、菲律宾 Zambles 蛇绿岩中的气苗均是自然界费托合成的证据<sup>[26]</sup>。

渤海湾盆地是一个主要受壳-幔活动控制形成的新生代含油气盆地,郯庐断裂带切入地幔,断裂带邻区形成了高地温梯度区(辽宁辽源—抚顺含煤盆地地温梯度约为45.7℃/km,山东黄县、江苏沐阳、安徽庐江等地的地温梯度均超过40℃/km)。在此影响之下,冀中坳陷大王庄东、济阳坳陷滨南、黄骅坳陷翟庄子等地区均有无机成因气的发现<sup>[27]</sup>。辽河坳陷地处渤海湾盆地北部,受郯庐断裂带北段分支营口—佟二堡断裂及派生断裂控制,东部凹陷葵探1井小东沟组天然气 $\delta^{13}\text{C}_1>-20\text{‰}$ ,最重的达-14.8‰。研究区东北方向的界3井(位置见图1a)侏罗系天然气的R/Ra值为3.9<sup>[28]</sup>,如此高的R/Ra值与郯庐断裂的地幔脱气活动有关。当天然气的 $\delta^{13}\text{C}_1>-20\text{‰}$ 、R/Ra值 $>0.1$ 时,无机成因的可能性很大<sup>[29-30]</sup>。

## 4.3 天然气成藏模式

基于前述分析,认为辽河坳陷滩海东部地区侏罗系与古近系属于两个天然气成藏系统(图5):侏罗系为无机成因气系统,天然气来自于深大断裂所沟通的地壳深部或地幔;古近系为有机热成因气系统,天然气来自于古近系沙三段烃源岩,东营末期和馆陶期—明化镇期是主要聚集期。从葵探1井气样地球化学分析结果来看,侏罗系与古近系天然

气的甲烷碳同位素组成差异显著,说明两者之间并未发生混合,这与沙三段底部发育良好的泥岩隔层有关。侏罗系天然气的运聚成藏期应晚于沙三段底部泥岩的形成时期,结合营口—佟二堡断裂带在东营末期发生了大规模的走滑运动,认为东营末期是无机成因气的主要聚集期。

以有机-无机天然气双源成因模式为指导,认为盖州滩洼陷沙三段成熟烃源岩周边热成因气是辽河坳陷滩海东部地区现实的勘探领域,沿NE向营口—佟二堡走滑断裂带的中古生界深层、超深层应具有较大的无机天然气勘探潜力,可作为积极探索的领域。

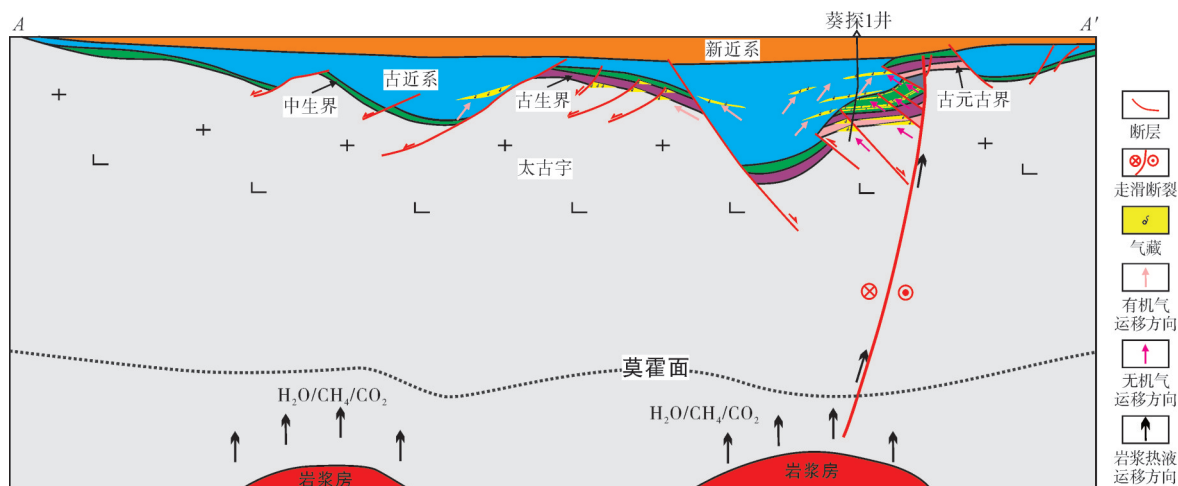


图5 辽河坳陷滩海东部地区天然气成藏模式图(剖面位置见图1a)

Fig. 5 Natural gas accumulation model in the eastern offshore of Liaohe Depression (location is shown in Fig. 1a)

## 5 结论

辽河坳陷滩海东部地区盖州滩洼陷沙河街组三段成熟气源岩的规模发育以及营口—佟二堡壳幔走滑断裂带的活动,使得研究区具有发育有机-无机双源气的地质条件。葵探1井的钻探证实滩海东部地区形成了3套含气层系,2种类型的天然气聚集。第1种类型为古近系东营组和沙三段有机成因天然气:天然气组分以甲烷为主,干燥系数在0.789~0.949之间,甲烷碳同位素组成主要分布在 $-35\%$ 左右;主要气源岩为盖州滩洼陷沙三中下亚段泥岩,在东营末期和馆陶期—明化镇期两期聚集成藏;中浅层东营组天然气成熟度整体显著高于同深度泥岩,指示其自深部地层运移而来,深层沙三段天然气成熟度与同深度泥岩差异不大,以原地聚集为主。第2种为侏罗系无机成因型天然气:天然气干燥系数平均值为0.991,具有极重的甲烷碳同位素特征,整体 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值 $>-20\%$ ,与松辽盆地昌德气藏天然气非常相似;推测东营末期深大断裂沟通地壳深部或地幔,费托合成的无机天然气沿断裂带聚集成藏。盖州滩洼陷沙三段成熟烃源岩周边是热成因气勘探的现实领域,同时NE向延伸近200 km的营口—佟二堡走滑断裂带

内多处发育高R/Ra值气苗和广泛的火山岩,为沿深大断裂附近寻找无机成因气提供了新的风险领域。

## 参考文献

- [1] 施和生,王清斌,王军,等. 渤中凹陷深层渤中19-6构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 36-45.  
SHI Hesheng, WANG Qingbin, WANG Jun, et al. Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 structure in deep Bozhong sag [J]. China petroleum exploration, 2019, 24(1): 36-45.
- [2] 胡英杰,蔡国钢,刘兴周,等. 辽河坳陷东部滩海深层—超深层天然气勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(2): 24-34.  
HU Yingjie, CAI Guogang, LIU Xingzhou, et al. Great discovery and significance of natural gas exploration in deep to ultra-deep formation in eastern tidal zone of Liaohe Depression [J]. China petroleum exploration, 2023, 28(2): 24-34.
- [3] 戴金星,文亨范,宋岩. 五大连池地幔成因的天然气[J]. 石油实验地质, 1992, 14(2): 200-203.  
DAI Jinxing, WEN Hengfan, SONG Yan. Natural gas of the mantle origin in Wudalianchi [J]. Petroleum geology & experiment, 1992, 14(2): 200-203.
- [4] 霍秋立,杨步增,付丽. 松辽盆地北部昌德东气藏天然气成因[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(4): 17-19.  
HUO Qiuli, YANG Buzeng, FU Li. Genesis of natural gas of eastern Changde gas pool in northern Songliao Basin [J]. Petro-



- leum exploration and development, 1998, 25(4): 17-19.
- [5] 龚思敏, 蒋有录, 侯帅, 等. 辽河东部凹陷牛居—长滩洼陷沙河街组天然气成因类型及来源[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(6): 1781-1790.  
GONG Simin, JIANG Youlu, HOU Shuai, et al. Genetic types and source of natural gas of Shahejie Formation in Niuju-Changtan sag of eastern Liaohe Depression[J]. Journal of Jilin University (earth science edition), 2022, 52(6): 1781-1790.
  - [6] 吴嘉, 何坤, 孟庆强, 等. 沉积盆地超深层有机—无机复合生烃机理及地质模式[J]. 地质学报, 2023, 97(3): 961-972.  
WU Jia, HE Kun, MENG Qingqiang, et al. Hydrocarbon generation mechanism via the organic-inorganic interaction pathway and its geological pattern in ultra-deep sedimentary basins[J]. Acta geologica sinica, 2023, 97(3): 961-972.
  - [7] 刘全有, 吴小奇, 朱东亚, 等. 含油气盆地有机无机作用下非生物烷烃气形成与资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(2): 155-163.  
LIU Quanyou, WU Xiaoqi, ZHU Dongya, et al. Generation and resource potential of abiogenic alkane gas under organic-inorganic interactions in petroliferous basins[J]. Natural gas geoscience, 2021, 32(2): 155-163.
  - [8] 单家增, 张占文, 孙红军, 等. 营口—佟二堡断裂带成因机制的构造物理模拟实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 15-17.  
SHAN Jiazeng, ZHANG Zhanwen, SUN Hongjun, et al. Modeling experiments of generation mechanism of Yingkou-Tongerbu fracture zone in the Liaohe Depression[J]. Petroleum exploration and development, 2004, 31(1): 15-17.
  - [9] 张凤莲, 单俊峰, 吴兴录, 等. 辽河滩海地区古近系层序地层特征及控砂、控藏作用[J]. 现代地质, 2012, 26(3): 560-568.  
ZHANG Fenglian, SHAN Junfeng, WU Xinglu, et al. Stratigraphic sequence characteristics of Paleogene in the beach area in Liaohe Depression and the control effect on sand and reservoir forming[J]. Geoscience, 2012, 26(3): 560-568.
  - [10] 徐永昌, 孙明良, 沈平, 等. 天然气氮同位素的测定及其在天然气研究中的应用[J]. 石油实验地质, 1990, 12(3): 316-325.  
XU Yongchang, SUN Mingliang, SHEN Ping, et al. Isotopic measurements of nitrogen and their application in natural gas[J]. Petroleum geology & experiment, 1990, 12(3): 316-325.
  - [11] MILKOV A V, ETIOPE G. Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of > 20,000 samples[J]. Organic geochemistry, 2018, 125: 109-120.
  - [12] 戴金星. 非生物天然气资源的特征与前景[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 1-6.  
DAI Jinxing. Characteristic of abiogenic gas resource and resource perspective[J]. Natural gas geoscience, 2006, 17(1): 1-6.
  - [13] 戴金星. 天然气地质和地球化学论文集: 卷二[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.  
DAI Jinxing. Natural gas geology and geochemistry: volume II [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
  - [14] 谢增业, 李志生, 魏国齐, 等. 腐泥型干酪根热降解成气潜力及裂解气判识的实验研究[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(6): 1057-1066.  
XIE Zengye, LI Zhisheng, WEI Guoqi, et al. Experimental research on the potential of sapropelic kerogen cracking gas and discrimination of oil cracking gas[J]. Natural gas geoscience, 2016, 27(6): 1057-1066.
  - [15] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学: 卷一[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.  
DAI Jinxing, PEI Xigu, QI Houfa. Natural gas geology of China: volume 1 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
  - [16] 刘文汇, 徐永昌. 煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理[J]. 地球化学, 1999, 28(4): 359-366.  
LIU Wenhui, XU Yongchang. A two stage model of carbon isotopic fractionation in coal gas [J]. Geochimica, 1999, 28(4): 359-366.
  - [17] 秦胜飞, 陶士振, 涂涛, 等. 川西坳陷天然气地球化学及成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 34-38, 54.  
QIN Shengfei, TAO Shizhen, TU Tao, et al. Characteristics of natural gas geochemistry and accumulation in Western Sichuan Depression [J]. Petroleum exploration and development, 2007, 34(1): 34-38, 54.
  - [18] 谢增业, 杨春龙, 董才源, 等. 四川盆地中泥盆统和中二叠统天然气地球化学特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(4): 447-461.  
XIE Zengye, YANG Chunlong, DONG Caiyuan, et al. Geochemical characteristics and genesis of Middle Devonian and Middle Permian natural gas in Sichuan Basin, China [J]. Natural gas geoscience, 2020, 31(4): 447-461.
  - [19] PAPE T, BÜNZ S, HONG Weili, et al. Origin and transformation of light hydrocarbons ascending at an active pockmark on Vestnesa Ridge, Arctic Ocean [J]. Journal of geophysical research: solid earth, 2020, 125(1): e2018JB016679.
  - [20] CAO Lei, LIAN Chao, ZHANG Xin, et al. Geochemical origin of methane in hydrothermal fluid and its implication for the subseafloor hydrothermal circulation at the Middle Okinawa Trough [J]. Geo-marine letters, 2021, 41(3): 31.
  - [21] KIETÄVÄINEN R, AHONEN L, NIINIKOSKI P, et al. Abiotic and biotic controls on methane formation down to 2.5 km depth within the Precambrian Fennoscandian Shield [J]. Geochimica et cosmochimica acta, 2017, 202: 124-145.
  - [22] KATZ B J, MANCINI E A, KITCHKA A A. A review and technical summary of the AAPG Hedberg Research Conference on "origin of petroleum: biogenic and/or abiogenic and its significance in hydrocarbon exploration and production" [J]. AAPG bulletin, 2008, 92(5): 549-556.
  - [23] SHOUP R C, LAMBIASE J, CULLEN A B, et al. A review and technical summary of the AAPG Hedberg Research Conference "variations in fluvial-deltaic and coastal reservoirs deposited in tropical environments" [J]. AAPG bulletin, 2010, 94(10): 1477-1484.
  - [24] 陶明信, 徐永昌, 史宝光, 等. 中国不同类型断裂带的地幔脱气与深部地质构造特征[J]. 中国科学(地球科学), 2005, 35(5): 441-451.  
TAO Mingxin, XU Yongchang, SHI Baoguang, et al. Mantle degassing and deep geological structure characteristics of different types of fracture zone in China [J]. Scientia sinica (terae), 2005, 35(5): 441-451.
  - [25] ROFER-DEPOORTER C K. A comprehensive mechanism for the Fischer-Tropsch synthesis [J]. Chemical reviews, 1981, 81(5): 447-474.
  - [26] ABRAJANO T A, STURCHIO N C, BOHLKE J K, et al.



- Methane-hydrogen gas seeps, Zambales Ophiolite, Philippines: deep or shallow origin? [J]. Chemical geology, 1988, 71(1/3): 211-222.
- [27] 张恺. 渤海湾盆地深部壳-幔结构和大地热流场对油气分布、富集规律控制的探讨[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(6): 1-7, 14.
- ZHANG Kai. A study on the control of deep crust-mantle structure and heat flow on petroleum distribution and accumulation in Bohaiwan Basin [J]. Petroleum exploration and development, 1993, 20(6): 1-7, 14.
- [28] 徐永昌. 世界首例沉积壳层幔源工业储集的发现[J]. 沉积学报, 1993, 11(3): 52-56.
- XU Yongchang. The world's first discover of industrial helium reservoir in sedimentary crust with mantle origin [J]. Acta sedimentologica sinica, 1993, 11(3): 52-56.
- [29] HILTON D R, CRAIG H. The Siljan deep well: helium isotope results [J]. Geochimica et cosmochimica acta, 1989, 53(12): 3311-3316.
- [30] 宋岩, 徐永昌. 天然气成因类型及其鉴别[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 24-29.
- SONG Yan, XU Yongchang. Origin and identification of natural gases [J]. Petroleum exploration and development, 2005, 32(4): 24-29.

编辑:董庸

## Geochemical characteristics of natural gas and dual-source pattern of thermogenic gas and inorganic gas in the eastern offshore of Liaohe Depression

HU Yingjie, LIU Xingzhou, HUANG Shuangquan, CAI Guogang, WANG Yanshan, LI Jinyou, YANG Guangda, HOU Tuo, ZHANG Dongwei

*PetroChina Liaohe Oilfield Company*

**Abstract:** In 2022, a significant gas breakthrough was achieved in the key exploration well (Kuitan-1) located in the Kuihuadao structural belt of the eastern offshore, Liaohe Depression, with high-productivity gas flows in Dongying Formation, Shahejie Member 3, and Jurassic Xiaodonggou Formation. It is worth noting that there are significant differences in methane carbon isotope composition ( $\delta^{13}\text{C}_1$ ) between the Mesozoic and Cenozoic natural gas formations. Determining the origin of natural gas and its source rock is significant for assessing the potential of natural gas resources and selecting exploration targets. This paper systematically analyzes geochemical data such as the components and stable carbon isotope composition of natural gas samples from the three gas-bearing strata. The results indicate that there are organic thermogenic gas and inorganic gas in the eastern offshore: (1) The natural gas in the Dongying Formation and Shahejie Formation belongs to the coal-type organic thermogenic gas, mainly consisting of methane, the dryness coefficient is at the range of 0.789-0.949.  $\delta^{13}\text{C}_1$  is mainly around  $-35\text{‰}$ . Natural gas originates from the mature mudstone in the middle and lower part of Shahejie Formation in Gaizhoutan sag, and accumulates during the late Dongying-Minghuazhen periods. According to the empirical formula,  $R_o$  of gas source rock ranges from 0.77% to 1.59%. There is a clear indication of migration effects for natural gas in the middle and shallow Dongying Formation, with clearly higher  $R_o$  of gas source rock than the mudstone at the same depth. In the deep Shahejie Member 3, it accumulates in situ or with short distance migration, indicated by the similar or slightly higher  $R_o$  of gas source rock than the mudstone at the same depth. (2) The natural gas in Jurassic Xiaodonggou Formation is of inorganic origin. It has an average dryness coefficient of 0.991 and is characterized by extremely heavy methane carbon isotope ( $\delta^{13}\text{C}_1 > -20\text{‰}$ ). It's inferred that the natural gas originates from Fischer-Tropsch synthesis in the deep crust or mantle, migrates and accumulates along the deep-seated fault with strike-slip activity during the late Dongying period. These natural gas reservoirs of two genetic types have obvious vertical separation and different accumulation processes. Plays around the Shahejie mature source rocks in the Gaizhoutan sag and the Yingkou-Tong'erbu strike-slip zone are favorable to organic thermogenic gas and inorganic gas respectively.

**Key words:** carbon isotope; gas components; thermogenic gas; inorganic gas; Fischer-Tropsch synthesis; eastern offshore; Liaohe Depression

**HU Yingjie**, First author: Professorate Senior Engineer, mainly engaged in oil and gas exploration and reserve research. Add: No. 95 Shiyu Street, Xinglongtai District, Panjin, Liaoning 124010, China. E-mail: huyj@petrochina.com.cn

**HUANG Shuangquan**, Corresponding author: Senior Engineer, mainly engaged in oil and gas geochemistry and resource evaluation. Add: No. 95 Shiyu Street, Xinglongtai District, Panjin, Liaoning 124010, China. E-mail: huangsq01@petrochina.com.cn