

引用: 陈星州, 郭强, 张斌, 等. 辽河坳陷东部凹陷煤系成因生物气特征及勘探突破[J]. 中国石油勘探, 2024,29(1):76-91.

Chen Xingzhou, Guo Qiang, Zhang Bin, et al. Characteristics and exploration breakthrough of coal measure genetic biogas in Eastern Sag of Liaohe Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2024,29(1):76-91.

辽河坳陷东部凹陷煤系成因生物气特征及勘探突破

陈星州^{1,2} 郭强¹ 张斌¹ 韩宏伟¹ 孙新宇¹ 刘岩¹ 杜新军¹

(1 中国石油辽河油田公司; 2 中国石油大学(北京)地球科学学院)

摘要: 辽河坳陷东部凹陷是我国最早发现生物气的地区之一, 勘探早期由于中深层勘探效果较好, 对浅层生物气一直未重视, 缺乏对浅层生物气源岩和分布规律的正确认识。在对已钻井发现浅层气(藏)地球化学特征开展系统分析基础上, 以碳同位素值等为主要指标, 将东部凹陷浅层气划分为原生生物气、生物—过渡带气、改造型生物气和混合气4种类型; 进一步探讨了浅层气成因, 认为研究区内浅层生物气主要为煤系地层成因; 深化研究形成了浅层生物气分布明显受煤系地层、碎屑岩优质储层、沙河街组沙三上亚段和沙一段两套区域性封盖层等因素控制, 构造晚定型、油气晚期充注成藏有利于形成浅层气的规模富集等地质认识。以此为指导, 发现了高产工业气流井与规模储量, 开辟了辽河坳陷煤系成因生物气勘探新局面。

关键词: 东部凹陷; 浅层气; 煤系成因生物气; 煤系地层; 晚期成藏

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2024.01.006

Characteristics and exploration breakthrough of coal measure genetic biogas in Eastern Sag of Liaohe Depression

Chen Xingzhou^{1,2}, Guo Qiang¹, Zhang Bin¹, Han Hongwei¹, Sun Xinyu¹, Liu Yan¹, Du Xinjun¹

(1 PetroChina Liaohe Oilfield Company; 2 College of Geoscience, China University of Petroleum (Beijing))

Abstract: The Eastern Sag of Liaohe Depression is one of the areas with the earliest biogas discoveries in China. The shallow biogas has not attracted much attention in the early exploration stage due to the good exploration results in the middle and deep formations, and there is a lack of understanding of source rocks and distribution law of shallow biogas. The geochemical characteristics of shallow gas (reservoir) in drilled wells are systematically analyzed, and a key index of carbon isotope is used to classify shallow gas (reservoir) in Eastern Sag into four types, including primary biogas, bio-transitional zone gas, transformed biogas and mixed type gas. Furthermore, the genesis of shallow gas is discussed, and it is indicated that the shallow biogas is dominated by coal measure genesis. The in-depth study supports to obtain geological understanding that the distribution of shallow biogas was distinctly controlled by coal measure strata, high-quality clastic rock reservoirs, two sets of regional cap rocks in the upper sub-member of the third member of Shahejie Formation (Es_3^1) and the first member of Shahejie Formation (Es_1), and the late formation of structures and late gas charging were conducive to the large-scale gas enrichment in shallow formations. Guided by the above understanding, high-yield gas wells and large-scale reserves have been discovered, opening up a new exploration field of coal measure genetic biogas in Liaohe Depression.

Key words: Eastern Sag, shallow gas, coal measure genetic biogas, coal measures strata, late stage gas accumulation

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”课题“渤海湾盆地北部油气富集规律与油气增储领域研究”(2016ZX05006-005); 辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC2007116)。

第一作者简介: 陈星州(1992-), 男, 辽宁盘锦人, 在读硕士, 工程师, 现主要从事石油地质综合研究及油气勘探方面的工作。地址: 辽宁省盘锦市兴隆台区辽河油田勘探开发研究院东部勘探所, 邮政编码: 124010。E-mail: chenxz01@petrochina.com.cn

收稿日期: 2022-03-29; 修改日期: 2023-12-12

0 引言

随着中国东部老油区进入高成熟勘探阶段,在老油区探索新的接替领域和方向,成为老油区持续良性发展的唯一出路^[1-3]。东部老油区面临着天然气冬季保供的重任,在低碳背景下寻找优质规模天然气储量是当前的工作重点^[4-6]。生物气具有埋藏较浅、分布广泛、勘探成本低、易于勘探开发等特点,很多国家已将其列为重要的研究和勘探对象^[7]。浅层气多以原生生物气、低熟气、次生生物气3种类型为主。原生生物气和次生生物气属于传统的生物气;低熟气是指低演化成熟阶段形成的以甲烷为主要组分的天然气,刘文汇对辽河拗陷天然气类型研究时称这种天然气为生物—热催化过渡带气^[8],或称为亚生物气、准生物气^[9]。尽管低熟气严格意义来讲不属于生物成因,但从深度上与生物气差异不大,将二者统一进行研究在勘探上是可行且有意义的。次生生物气是指经过一定热演化程度的烃类,由于构造挤压抬升而再次进入微生物作用带内,在适当的条件下由于微生物的作用而再次生成的生物气,即二次埋深变浅,适宜厌氧细菌的活动,属于再生型生物气。

次生生物成因和热成因混合煤层气在国内外不断被报道,研究表明,煤储层内赋存的生物气大多为次生生物气,是煤层经过后期的构造抬升作用至浅层,再经过外来微生物种群(主要是产甲烷菌群)的生物降解作用生成甲烷而保存在煤储层中的。最近研究还发现,部分煤田煤层中赋存一定数量的生物气,而且所占比例相当可观,陶明信等发现山西霍州李雅庄煤矿的煤层气以次生生物气为主^[10];张小军等认为淮南潘集第一煤矿煤层气中次生生物气占72%~79%^[11]。这些次生生物气在一定地质条件下,完全可能运移到砂岩储层中进而成藏,寻找这些次生生物气藏也被提上勘探日程。

很多学者对辽河拗陷东部凹陷浅层气成藏特征进行了研究^[12-14],总体认为浅层气以热成因油型气为主,因此部署思路也是沿大断裂寻找高点。但是自2000年以来,按照该思路一直未取得进展,勘探一度处于停滞状态。勘探停滞主要存在如下原因:一是在勘探早期主要针对主力层位,主观上缺乏对浅层的重视,早期的完钻井水泥返高不够并且浅层多未固封或固井质量差,测井系列不全,在客观上限制了对浅层的认识。二是浅层气的地球化学资料不配套,很多井地球化学资料不齐全甚至缺乏,给浅层气识别造成

了很大难度。三是由于原来主观认为浅层气主要为油型气,因此造成对分布规律、主控因素认识不清,只是单纯沿断裂寻找浅层气藏。四是气源岩不清楚,认为主要为沙河街组沙三中亚段湖相气源岩,而没有把沙三上亚段煤系地层作为主要气源岩,致使勘探方向不明确。

针对上述现状,为了打开浅层气勘探局面,重新对辽河拗陷东部凹陷浅层气成因和聚集规律进行研究,发现浅层气与煤系地层发育关系密切。围绕这一特点,开展浅层气成因研究,通过天然气成因鉴别,发现绝大部分浅层气为生物气,进一步充分利用地球化学资料并结合地质特征,发现浅层气同时也具有煤成气的特征,因此确定该浅层气为煤系成因生物气,建立了煤系地层与浅层气的联系。在浅层气成藏条件研究的基础上,建立了浅层气成藏模式,认为该区具有良好的煤系成因生物气成藏条件,基于以上认识,辽河拗陷东部凹陷浅层气勘探获得发现,开辟了煤系成因生物气勘探的新局面。

1 浅层天然气地质背景与勘探概况

辽河拗陷位于渤海湾盆地东北部(图1),为北东向展布的古近纪裂陷—新近纪拗陷,发育大民屯凹陷、西部凸起、西部凹陷、中央凸起、东部凹陷和东部凸起等次一级构造单元。

东部凹陷位于辽河拗陷东部,全域面积达3950km²,是投入勘探开发多年的高成熟探区。东部凹陷从下至上主要发育古近系与新近系,包括房身泡组(Ef)、沙河街组(Es)、东营组(Ed)、馆陶组(Ng)及明化镇组(Nm)。辽河拗陷东部凹陷为伸展和走滑两期构造变形叠加的产物,是具有“下断上拗”双层结构的裂谷系盆地。东部凹陷在形成过程中主要经历4个演化阶段:强烈断陷期(Es₃),早中期以伸展作用为主,晚期受短暂的挤压作用整体抬升,普遍缺少沙二段沉积地层;断拗转化期(Es₁),伸展与走滑共同作用时期,同时该时期也是初始走滑期,走滑作用开始介入演化阶段;强烈走滑期(Ed),总体上以走滑作用为主,伸展作用较弱,进入拗陷阶段,地层厚度不再受断层控制,该时期东部凹陷沉积中心发生迁移,从东侧的控盆断层附近迁移到中部;挤压反转期(Ng至今),凹陷整体受挤压作用影响,走滑作用持续进行,以沙三上亚段抬升为主,而以下地层基本保持原有形态或抬升很小,在东部凹陷中央背斜构造带形成明显的反转构造(图2),随着走滑

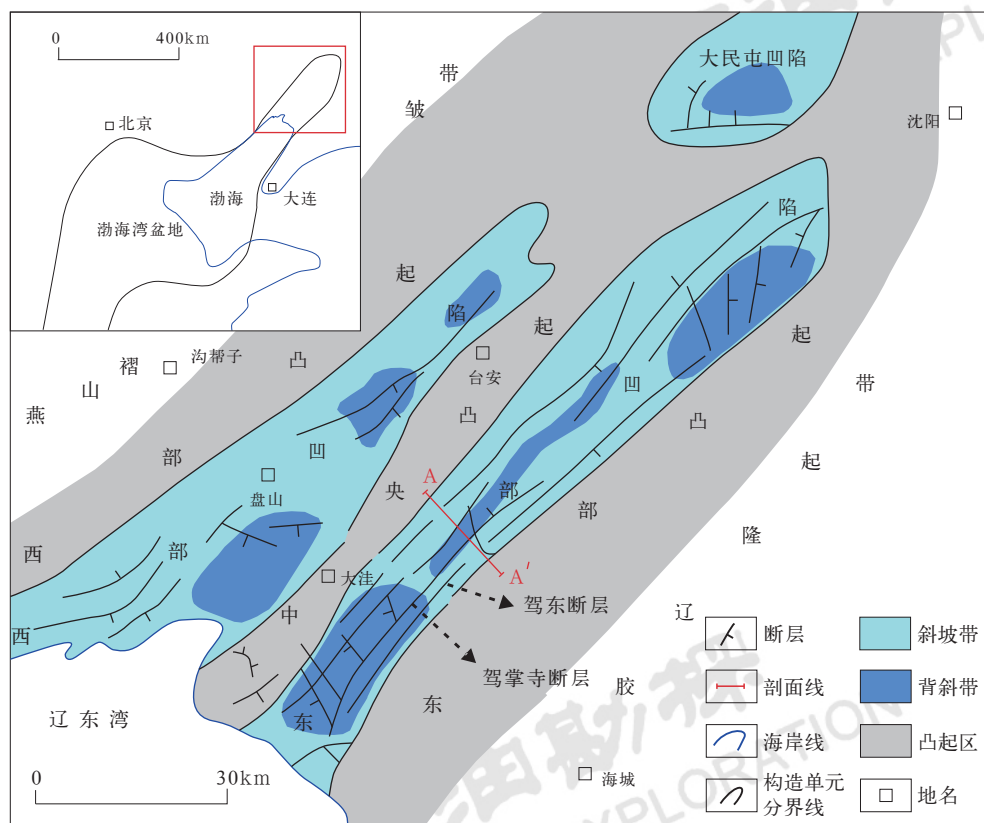


图1 辽河拗陷构造单元简图

Fig.1 Brief division of structural units in Liaohe Depression

强度大幅降低, 凹陷进入萎缩阶段, 断层活动微弱^[15]。东部凹陷走滑运动强烈, 经历了沙一段沉积期初始走滑、东营组沉积期强烈走滑和馆陶组沉积期衰减走滑 3 个阶段。构造运动频繁对天然气保存非常不利, 决定了东部凹陷浅层气藏具有明显的晚期成藏特征。

20 世纪中期就已发现东部凹陷沙三段煤层广泛分布, 也发现了生物气, 受区域构造活动和沉积演化控制, 研究区含煤层段主要发育在沙三上亚段, 形成于盆地断陷回返阶段, 该时期新增可容空间小于沉积物供给量过补偿背景下的沉积体系组合。东部凹陷沙三上亚段煤层主要分布于三角洲平原和滨湖相的泥炭沼泽中, 赋煤区主要位于东部凹陷中央背斜构造带和西部斜坡区, 面积达 205km²; 煤层埋藏深度一般在 1500~3800m 之间, 单煤层厚度一般在 1~10m, 大部分属于中厚层, 最大累计厚度可达 175.2m, 分布广泛且稳定。浅层气基本围绕煤层分布, 甚至就在煤层中分布。

勘探早期煤系成因生物气未引起充分关注, 张占文是最早认为辽河拗陷东部凹陷存在大量煤成气, 也

可能存在煤系成因生物气的学者^[16], 当年由于缺乏有效办法来鉴别煤系成因生物气, 因此一直未开展这方面的研究。本文在对煤系地层分布特征研究的基础上, 明确煤系地层是一套优质气源岩, 同时也是煤系成因生物气主要气源。构造演化特征研究表明东部凹陷在东营组沉积晚期开始构造反转, 东营组沉积末期构造定型, 受构造反转的影响, 沙三上亚段沉积时期煤系地层开始抬升, 抬升幅度近 500~1000m, 具有生气晚、充注晚、成藏晚的特点, 具备浅层气形成的有利条件, 是目前东部凹陷浅层气主要勘探领域。

2 浅层天然气分布、类型与成因

2.1 浅层天然气分布

辽河拗陷东部凹陷是我国最早发现生物气的凹陷之一, 早在 1967 年, 欧利坨子地区钻探的辽 12 井, 在浅层沙河街组获得了高产, 初期单井产量为 18×10⁴m³/d, $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -60.7‰, 为典型的生物气; 随后在东部凹陷多个地区浅层, 均有类似辽 12 井的生物气井发现。

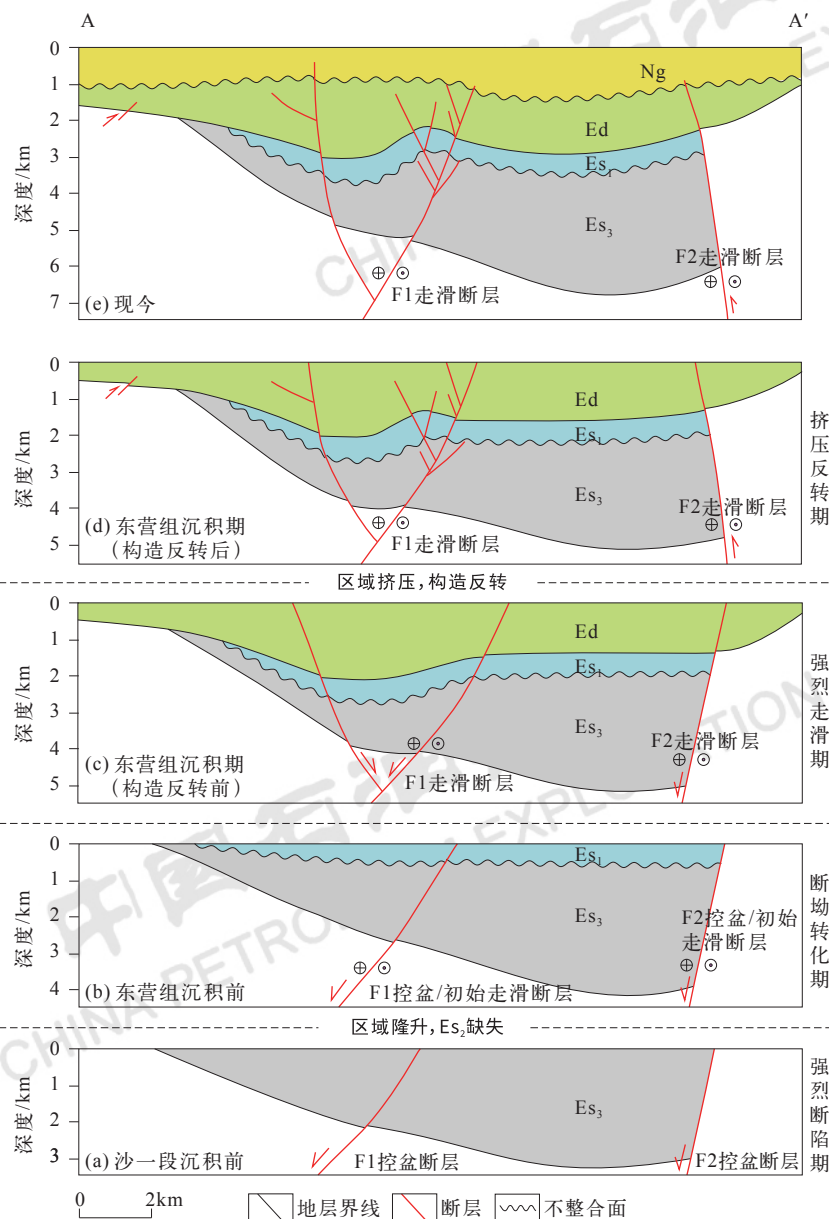


图 2 辽河拗陷东部凹陷构造发育史 (剖面位置见图 1)

Fig.2 Tectonic evolution history of Eastern Sag in Liaohe Depression (section location is in Fig.1)

目前, 东部凹陷在 2000m 以浅发现了具有一定规模的浅层天然气藏, 已经探明天然气地质储量 $20.8 \times 10^8 \text{m}^3$ 。纵向上, 浅层气主要分布在沙三上亚段、沙一段和东营组 (图 3), 局部地区在明化镇组也有发现。

平面上, 浅层气主要发育在东部凹陷中央背斜构造带, 已经发现了荣兴屯、桃园、黄金带、欧利坨子、牛居、青龙台等多个浅层气富集区, 斜坡带的浅层气以东部斜坡区为主, 发现了小龙湾和三界泡等浅层气发育区。气藏类型以构造气藏和岩性气藏为主, 构造气藏主要分布在中央背斜构造带和东部斜坡区; 岩性

气藏是东部凹陷最为发育的非构造气藏, 为砂岩上倾尖灭或侧向尖灭而形成, 以沙三段、沙一段和东营组最常见。牛居地区东营组发育典型的岩性气藏, 欧利坨子地区岩性气藏也十分普遍, 所发现的浅层气藏以砂岩气藏为主, 个别地区发现火山岩气藏和煤层气, 如欧利坨子地区的欧 15 井发现煤层气, 而黄沙坨地区的火山岩也见到气流。

2.2 浅层天然气分类与特征

通过对辽河拗陷东部凹陷 73 口井、11 个浅层天然气藏的统计分析, 发现东部凹陷浅层天然气特征

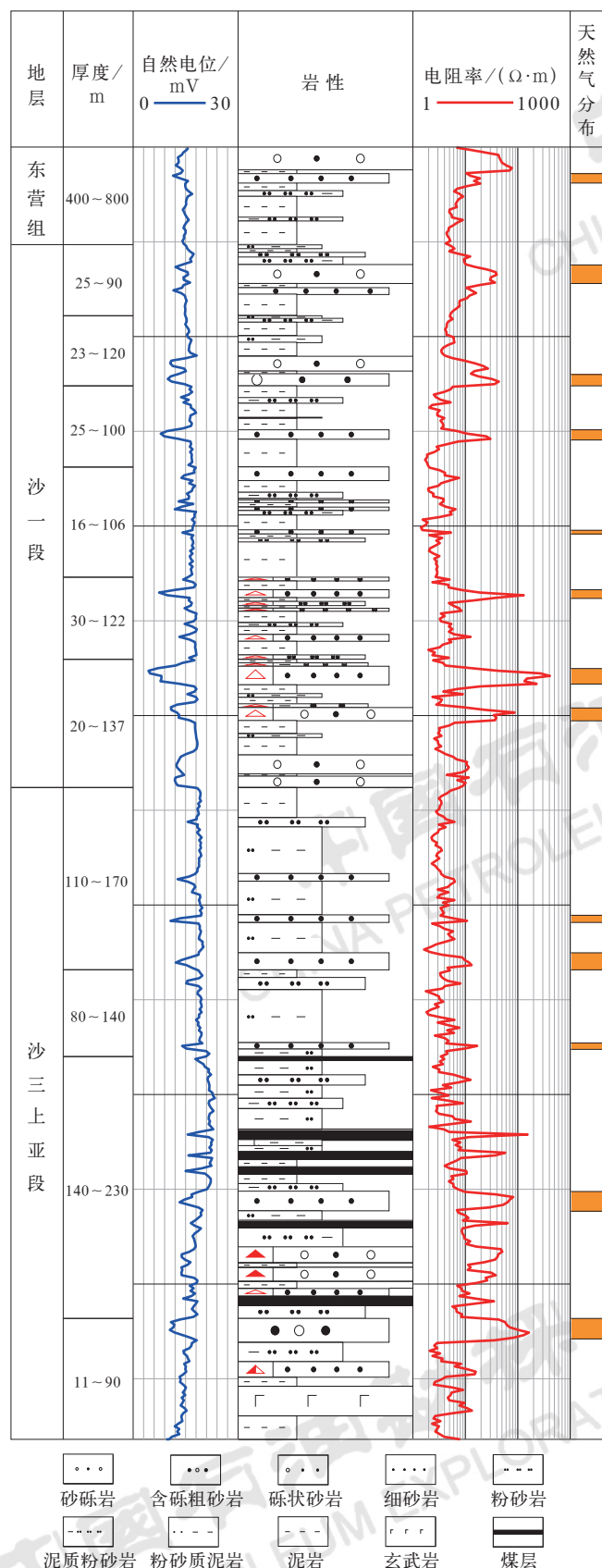


图 3 辽河坳陷东部凹陷浅层气分布柱状图

Fig.3 Column diagram of shallow gas distribution in Eastern Sag of Liaohe Depression

变化非常大, 富烃气、贫 H_2S 、少 N_2 和 CO_2 , 含有 He、Ar 等稀有气体, 且有机汞含量相对较高。甲烷含量大于 95%, 最高达 100%, 重烃含量一般小于 3%, 为典型干气特征。根据天然气碳同位素特征分析浅层气成因, 认为东部凹陷天然气可以分为 4 类, 即原生生物气、生物—过渡带气 (或称低熟气)、改造型生物气和混合气 (表 1)。

原生生物气甲烷的碳同位素值为 $-62.4\text{‰} \sim -55.5\text{‰}$, 乙烷的碳同位素值为 $-47.3\text{‰} \sim -39.8\text{‰}$, 丙烷的碳同位素值为 $-40.3\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$, 甲烷含量很高, $C_1/\sum C_{1-5}$ 基本大于 99%, 反映天然气组成具明显干气特征, 多分布在小于 1600m 的储层, 目前主要分布在青龙台、欧利坨子及小龙湾等地区, 具典型生物气特征。

生物—过渡带气甲烷的碳同位素值为 $-53.1\text{‰} \sim -45.7\text{‰}$, 乙烷的碳同位素值为 $-38.7\text{‰} \sim -26.5\text{‰}$, 丙烷的碳同位素值为 $-27.5\text{‰} \sim -19.8\text{‰}$, 湿气组分含量比原生生物气略有增加, $C_1/\sum C_{1-5}$ 基本大于 98%。这类天然气埋深稍大, 大多为 1400~1800m, 主要分布在青龙台、欧利坨子、热河台、于楼及小龙湾等地区, 按照本文划分方案属于生物气范畴。

改造型生物气重烃碳同位素明显异常, 有 4 口井具备该特征, 甲烷碳同位素值为 $-44.0\text{‰} \sim -40.4\text{‰}$, 乙烷碳同位素值为 $-13.1\text{‰} \sim -6.6\text{‰}$, 丙烷碳同位素值为 $-6.1\text{‰} \sim -3.3\text{‰}$ 。到目前为止, 除东部凹陷外, 还未见到辽河坳陷其他地区天然气藏中乙烷、丙烷如此富集重碳同位素的报道。陈振岩等^[17] 认为是深源无机成因气和有机气混合导致。由于这 4 口井 (黄 105、桃 18、桃 2、桃 7) 对应气体的 $\delta^{13}C_1$ 值 (为 -40‰ 左右) 与东部凹陷混合气基本一致 (桃 17 井, 2349.5m)

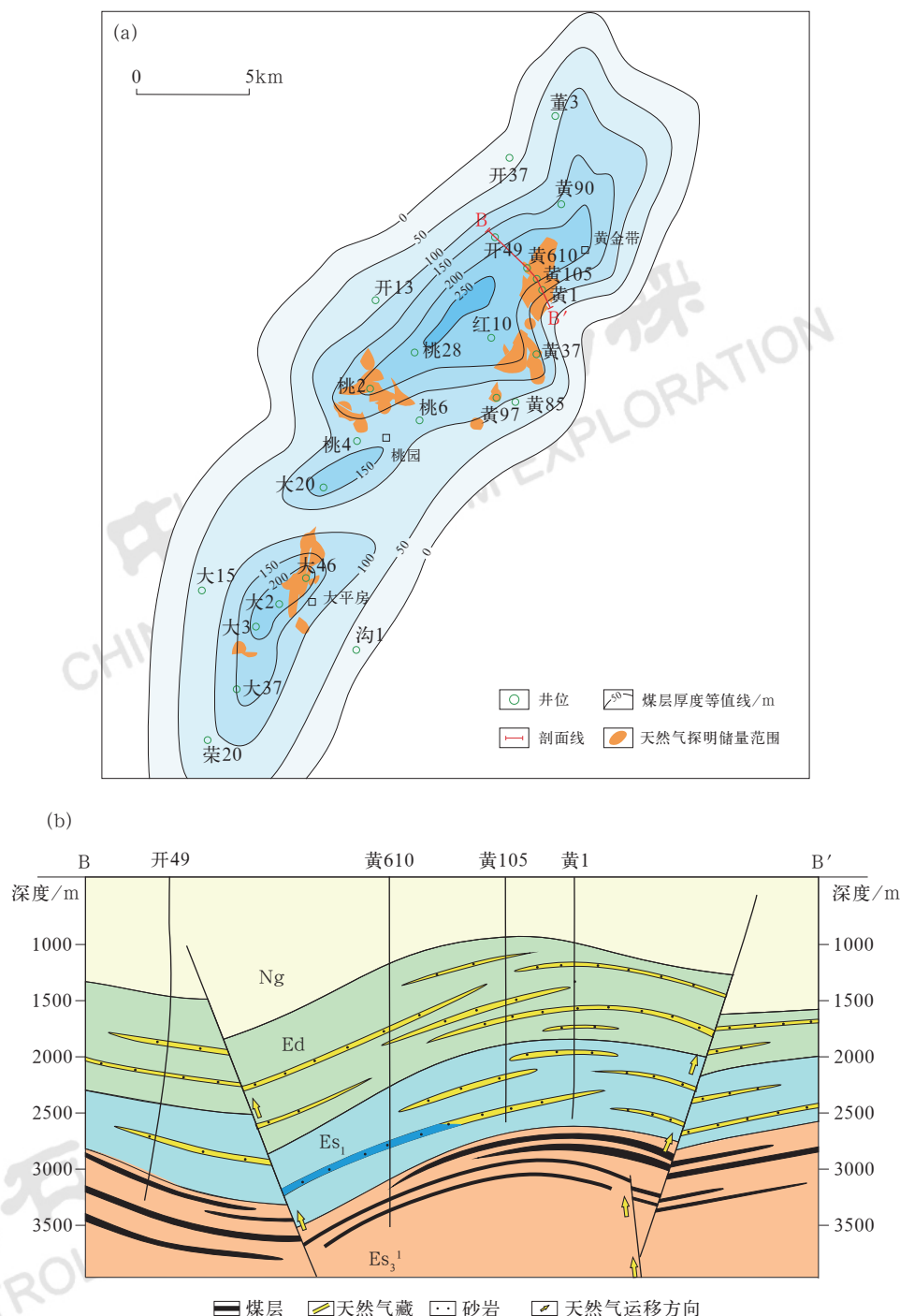
(表 1), 其甲烷碳同位素组成与无机成因气明显不符, 在东部凹陷的中深层也未发现该类天然气, 因此可以排除无机气混入的可能。李孝甫等^[18] 则指出应该是天然气后期遭受剧烈微生物降解作用所致。陈星州等^[19] 对辽河坳陷稠油成因和分布研究时发现, 东部凹陷除茨榆坨构造带边部有少量稠油外, 其他地区基本未发现稠油, 说明后期遭受剧烈微生物降解作用的可能性不大。陈践发等^[20] 对该类型天然气进行了详细分析, 排除了这种异常偏重是混合所致, 他认为这类天然气可能是未成熟阶段的生物气或低成熟阶段的生物—过渡带气经过细菌氧化产生的结果, 与本文的观点相吻合。理由如下: (1) 该类天然气埋深较浅 (1200~1400m), 从天然气组

表 1 辽河坳陷东部凹陷典型天然气组成与碳同位素值统计表
Table 1 Statistics of typical natural gas composition and carbon isotope in Eastern Sag of Liaohe Depression

井号	浅层天然气 分类	层位	深度 /m	C ₁ /%	C ₂ /%	C ₃ /%	C ₄₊ /%	N ₂ /%	CO ₂ /%	C ₁ /ΣC ₁₋₅	δ ¹³ C ₁ /‰	δ ¹³ C ₂ /‰	δ ¹³ C ₃ /‰
辽 12	原生生物气	沙一段	1585.1	97.80	0.32			1.82	0.05	99.67	-60.7		
龙气 5			1504.0	97.90	0.83	0.20	0.01	0.88	0.26	98.94	-55.5	-47.3	-40.3
欧 612			1885.5	97.70	0.57	0.05	0.03	1.52	0.07	99.34	-60.9		
小 10			1526.0	98.30	0.39	0.13	0.01	0.95	0.08	99.46	-59.3	-39.8	-30
小 12			1555.0	99.15				0.85		100.00	-59.3		
小 47	生物—过渡带气	沙三上亚段	1321.0	96.53	0.08			2.98		99.92	-62.4		
于 9			1775.0	96.49	2.06	0.60	0.22	0.62		97.10	-52.2	-33.6	-27.1
龙 17-021			1345.3								-51.7	-26.5	-19.8
龙 9			1376.0	97.85	0.68	0.41	0.01	0.94	0.06	98.89	-52.6	-35.5	-24.9
辽 6			1430.3								-53.1		
热 11	改造型生物气	沙一段	1451.5	98.70	0.93	0.05	0.02	0.28	0.01	99.00	-45.7	-26.6	-27.5
热气 2			1627.5	98.63	0.80	0.05		0.46	0.04	99.15	-49.4	-38.7	-27.2
小 13			1504.4	91.29	1.79	3.11	2.42	0.25			-51.7		
龙 14			1651.4	95.86	0.23	0.09	0.06	2.59	1.16	99.61	-51.8		
龙 26-20			1717.0	96.79	1.03	0.28	0.45	1.44		98.21	-47.9		
黄 105	混合气	东营组	1382.0	99.51	0.31	0.02		0.38	0.02	99.60	-44.0	-13.1	-3.7
桃 18			1315.0	97.17	1.76	0.01		0.99		98.21	-41.2	-9.7	
桃 2			1350.5	98.79	0.26	0.08	0.45	0.80	0.01	99.21	-40.4	-9.7	-3.3
桃 7			1271.5	99.64	0.22	0.01		0.16		99.79	-40.8	-6.6	-6.1
大 11-16			1897.0	86.93	6.46	2.86	3.1	0	0.06	87.50	-38.2	-26.8	-24.7
红 8-12		东营组	1749.0	68.67	17.23	7.93	4.33	1.10		69.96	-37.0	-27.5	-26.9
黄 23			1743.0	93.93	4.93	0.14	0.14	0.78	0.07	94.74	-41.5	-26.5	-25.8
牛 22-22			1901.0	87.74	8.26	1.28	0.83	1.62	0.19	89.43	-42.1	-26.4	-24.9
荣 6			1538.0	96.67	1.99	0.26	0.67	0.59	0.07	97.07	-38.4	-25.6	
荣 64			1293.5	97.91	1.98	0.05	0.03	0.04		97.94	-41.9	-24.7	-24.7
桃 17		沙一段	2349.5	87.08	7.15	3.53	1.22	0.55		87.98	-40.7	-27.6	-25.6

分来看重烃含量非常低 (C_{2+} 为 0.23%~1.77%), 为典型的干气特征, 应属于生物成因气。(2) 结合研究区的地质条件, 该区断裂非常发育, 有利于地下水活动, 地层水总矿化度为 1433.62mg/L, 明显较低, 地温为 60℃ 左右, 适合细菌生长, 为水交替强烈带^[19], 大气水非常活跃, 水的氧化能力较强, 氧化菌分解过程中优先分解天然气富含轻碳同位素的部分, 使得残留部分的碳同位素变重, 天然气被氧化得越多, 天然

气碳同位素组成就越重, 并可能出现异常。(3) 研究区浅层气与美国一些煤成次生生物气富集重碳同位素的情况类似^[21], 说明煤层比较容易被氧化。(4) 通过地质条件解剖, 这 4 口井都位于赋煤区, 煤层厚度相对较大, 煤层和碳质泥岩的累计厚度大于 200m, 这些煤层都经历了构造抬升, 天然气可通过断裂运移到浅层储层中, 具备次生生物气形成条件 (图 4)。东部凹陷浅层天然气碳同位素组成异常偏重可能是



由于细菌氧化所致,且应是未成熟阶段的生物气或经氧化改造而成,而且很可能就是煤成生物气或煤成次生生物气,因为煤成生物气重烃碳同位素本就是较重,改造后会更重,因此造成异常。(5)如果认为是成熟阶段的天然气被氧化而成,从碳同位素组成来看则仅仅是乙烷、丙烷遭受了氧化,而甲烷则未被氧化,这与天然气遭受氧化的规律不符。因为天然气遭受氧化是甲烷比乙烷、丙烷相对优先被氧化。按照同等被细菌氧化变化比例,其甲烷碳同位素值应为 $-60\text{‰} \sim -55\text{‰}$,乙烷碳同位素值和乙烷含量应分别为 -35‰ 和 30% 左右。研究区浅层气不单是乙烷、丙烷遭受了细菌的改造,甲烷也遭受了甲烷氧化菌的严重改造。根据地质背景和浅层气分布特征,黄105井等4口井的天然气应该是煤成生物气或煤成次生生物气,目前主要分布在断裂十分发育的桃园和黄金带地区。

混合气单纯从甲烷碳同位素特征来分析应该为热成因气,天然气干燥系数相对较高,甲烷碳同位素值为 $-42.1\text{‰} \sim -37.0\text{‰}$,乙烷碳同位素值为 $-27.6\text{‰} \sim -24.7\text{‰}$,丙烷碳同位素值为 $-26.9\text{‰} \sim -24.7\text{‰}$ 。李孝甫等^[18]对东部凹陷天然气地球化学特征进行研究,认为这些天然气主体属于低熟气范畴,而且基本为煤型低熟气。研究发现,改造型生物气的4口井重烃碳同位素明显异常主要分布在黄金带和桃园地区,其中黄23井与黄105井同处于一个构造带,桃17井与桃2井、桃7井、桃18井也处于相同构造带,它们成藏条件相近,而且毗邻,说明黄23井和桃17井的天然气也应该受到了氧化,只是位置不同、氧化程度有差异,因此完全依赖碳同位素来判断天然气成因有一定的局限性。本文利用轻烃指标进一步判识天然气成因类型,应用正庚烷指数和异庚烷指数来判识天然气成熟度。Xu Yongchang等^[22]对国内不同盆地、不同成熟度的天然气样品进行了轻烃地球化学分析,并初步厘定了煤型气正庚烷值和异庚烷值指标。确定了轻烃判识天然气成熟度的标准(图5)。从图5可见,辽河拗陷东部凹陷天然气样品的异庚烷值分布在低熟气范围,而正庚烷值普遍偏低,很多浅层气明显落在生物气的范围内。研究表明腐殖型母质形成的轻烃组分富含异构烷烃和芳香烃,因此更加证实东部凹陷浅层气是煤成生物气的可能。结合东部凹陷地质特征,认为该区以煤系成因生物气为主,有些地区是煤系成因生物气与热成因气的混合气,使东部凹陷天然气类型更加

复杂化,但是无论如何,东部凹陷浅层气属于煤系成因生物气是比较普遍的现象,煤系成因生物气在东部凹陷全区均有分布。

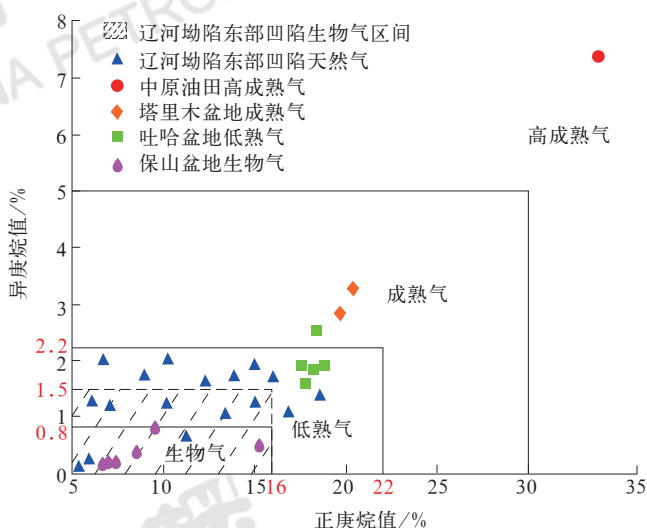


图5 辽河拗陷东部凹陷煤型气正庚烷值和异庚烷值关系图^[16,20]

Fig.5 Relationship between heptane and isoheptane of coal type gas in Eastern Sag of Liaohe Depression^[16,20]

2.3 浅层天然气成因

虽然浅层气成因类型复杂,但进一步分析发现,不同类型浅层气的形成均与煤层关系密切,以煤系成因生物气为主,有的遭受氧化降解作用,使成因更加复杂化,同时也存在煤系成因生物气与热成因气的混合气。

2.3.1 浅层气乙烷碳同位素较重

无论是否遭受过强烈的生物化学作用,大多数天然气中乙烷均较重。乙烷碳同位素组成是区分煤型气和油型气重要指标,也是划分有机热成因气来源类型的主要指标^[23],这是因为天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值受成熟度的影响较小^[24],陈星州等^[19]基于我国吐哈盆地勘探实际,将偏腐殖型有机质在低演化阶段形成的天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 下限值定为 -29‰ 。辽河拗陷东部凹陷天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值主要分布在 $-29\text{‰} \sim -25\text{‰}$ 之间,反映了以煤型气为主的特征(图6)。

2.3.2 浅层气汞含量普遍高

浅层气中的汞含量可以作为天然气成因判识标准。一方面,天然气中通常含有来源于烃源岩的汞和汞化合物,且通常以挥发组分的形式聚集在天然气藏中^[25-26]。另一方面,不同有机质成因的天然气具有不同的汞含量,腐殖型有机质成因气中的汞含量较混合

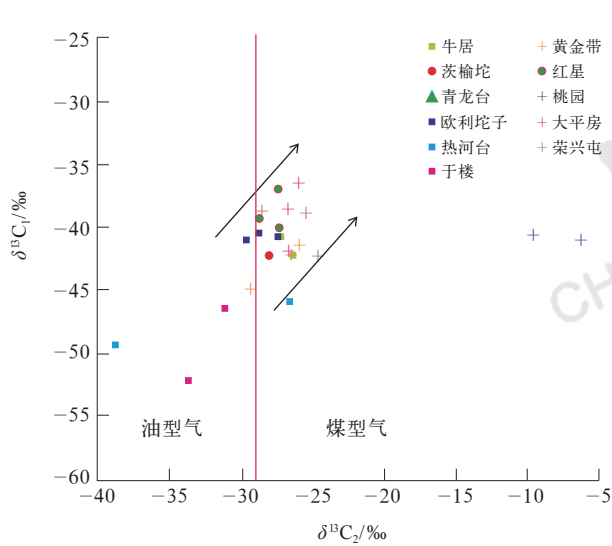


图 6 辽河拗陷东部凹陷不同地区天然气 $\delta^{13}\text{C}_1-\delta^{13}\text{C}_2$ 关系图
Fig.6 Plot of natural gas $\delta^{13}\text{C}_1-\delta^{13}\text{C}_2$ in Eastern Sag of Liaohe Depression

型—腐泥型有机质成因气高^[27-28]。戴金星等对 12 个盆地煤型气和油型气中汞含量进行了统计, 结果表明煤型气的汞含量较油型气的高, 一般油型气中汞含量低于 600ng/m³, 煤型气中汞含量高于 700ng/m³^[29-30]。辽河拗陷东部凹陷浅层气中汞含量明显偏高, 为 14000~70000ng/m³, 体现了以煤为主要气源岩的特征^[31] (表 2)。

2.3.3 浅层气轻烃普遍富含异构烷烃

轻烃指标是判识天然气成因类型的另一重要手段。一般腐殖型母质形成的轻烃组分富含异构烷烃和芳香烃, 腐泥型母质来源的轻烃富含正构烷烃。辽河拗陷东部凹陷天然气 C₅₋₇ 系列脂肪族化合物中异构烷烃含量高 (40%~60%), 正构烷烃仅占 20%~40%, 环烷烃 (CC₅₋₇) 含量最低 (图 7), 表明成烃母质偏腐殖型, 应以煤系烃源岩有机质来源为主^[18]。

表 2 辽河拗陷东部凹陷浅层气中汞含量统计表

Table 2 Statistics of mercury contents in shallow gas in Eastern Sag of Liaohe Depression

构造区块	层位	井深 /m	汞含量 / (ng · m ⁻³)
荣兴屯	Ed	1676	34400
		1457	52500
大平房	Ed	1653	35400
		1456	35200
黄金带、于楼、 热河台、欧利坨子	Ed	1357	18000
		2108	43300
	Es ₁	1765	14400
牛居	Ed	1725	69900

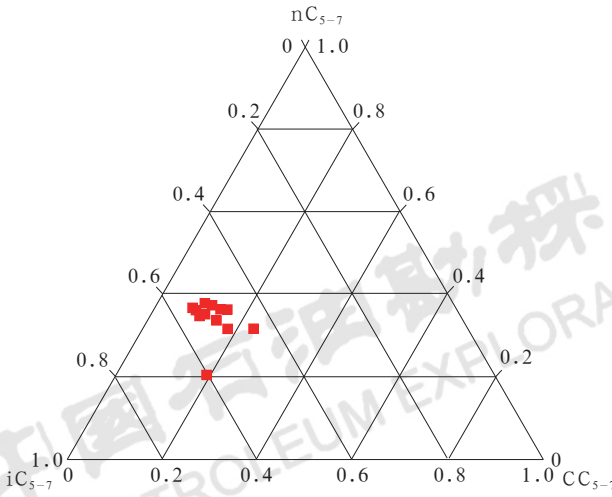


图 7 辽河拗陷东部凹陷浅层气 C₅₋₇ 烷烃组分特征图
Fig.7 Characteristics of C₅₋₇ alkane components in shallow gas in Eastern Sag of Liaohe Depression

3 浅层气成藏条件与富集模式

3.1 浅层气分布明显受煤系地层控制

浅层气主要分布在荣兴屯—大平房—桃园—黄金带—欧利坨子—青龙台等中央构造带的浅层 (小于 2000m), 中央背斜构造带受后期走滑断裂影响, 往往形成反转构造, 反转的地层也是从沙三上亚段即煤系地层开始抬升。吴翔^[32] 根据煤层分布的稳定性、厚度及煤层组合规律, 并充分利用测井曲线形态及非煤标志层等特征, 在东部凹陷一共划分了 11 个煤层 (组), 分为上、下两个煤层群, 东部凹陷自西南至东北分为荣兴屯—大平房、桃园、黄金带、热河台—小龙湾、欧利坨子和青龙台 6 个赋煤区, 它们构成了东部凹陷的主力煤层。东部凹陷浅层气的分布与赋煤

区高度吻合(图 8),按照传统生物气划分标准,目前已经证实的 6 口生物气探井也均分布在赋煤区内,从纵向分布特征来看,浅层气一般分布在煤层之间或之上,东部凹陷所有钻遇煤层的井,在钻遇煤层时

气测显示明显异常,气测全烃最高可达 37%,平均为 10%~17%,说明煤层本身就具有很好的生气条件,也进一步证明煤层与浅层气分布关系密切,因此浅层气分布和煤层有直接的关联。

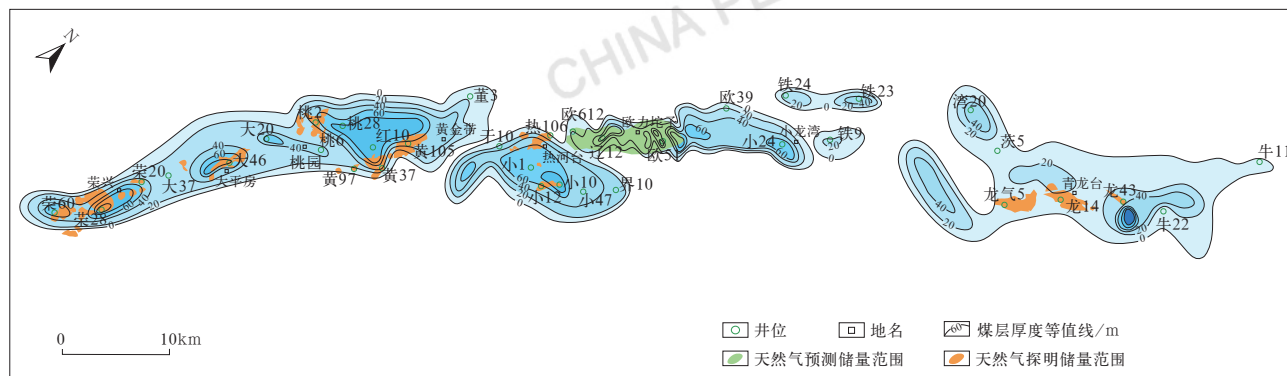


图 8 辽河拗陷东部凹陷浅层气分布与煤层厚度关系图

Fig.8 Relationship between shallow gas distribution and coal seam thickness in Eastern Sag of Liaohe Depression

3.2 煤系地层提供丰富物质基础

通过研究区上百口井煤层横向标定和横纵向对比发现,辽河拗陷东部凹陷沙三段上部煤系地层十分发育。从图 8 上看,热河台—小龙湾和青龙台 2 个赋煤区在东部凹陷主轴线东侧,只有热河台—小龙湾赋煤区位于斜坡上,其他赋煤区基本位于东部凹陷的主轴线附近,即在中央背斜构造带上,面积达 205km²。纵向上,煤层埋藏深度一般在 1500~3800m 之间,均超过 1000m。单煤层平均厚度为 1~10m,其中热

河台—三界泡地区煤层最发育并且连续分布(图 9),有 37 个单层,累计厚度可达 175.2m,煤层厚度大,为煤成气生成与富集奠定了良好的物质基础。煤的生气能力和气体组成主要取决于煤岩的显微组成及煤化作用阶段,从表 3 可以看出,东部凹陷煤岩中镜质组含量普遍较高,一般超过 80%,而惰质组含量一般处于 0~15% 之间;个别样品壳质组与镜质组含量呈反向关系(如界 10 井),说明整个凹陷成煤环境基本一致,均以陆源高等植物输入为主,有机质母质多属腐殖型(Ⅲ),以生气为主。戴金星等^[29]通过模拟

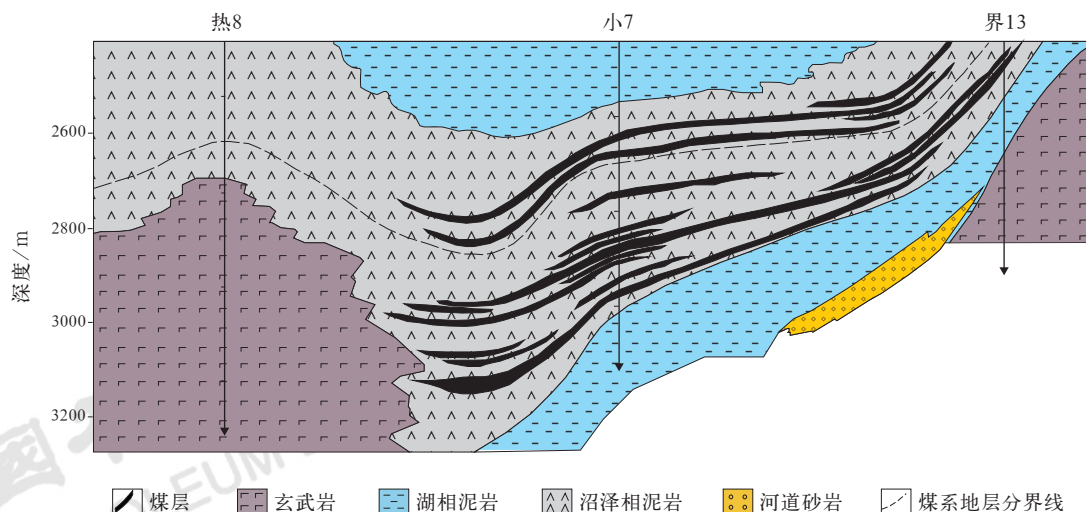


图 9 辽河拗陷东部凹陷沙三段煤系地层热 8—界 13 井沉积相剖面图

Fig.9 Sedimentary facies section cross wells Re8-Jie13 of coal measure strata in the third member of Shahejie Formation in Eastern Sag of Liaohe Depression

表 3 辽河拗陷东部凹陷沙三上亚段煤系烃源岩组分及成熟度表

Table 3 Summary of the maceral and maturity of coal measure source rocks in the upper sub-member of the third member of Shahejie Formation in Eastern Sag of Liaohe Depression

井号	井深 /m	岩性	镜质组 /%	壳质组 /%	惰质组 /%	R_o /%
荣 30	1928.8	煤岩	82.7	17.3		
桃 10	3408	煤岩	85.7	14.1	0.2	
小 8	2245~2247	碳质泥岩	95.1	2.1	2.8	0.47
界 10	1192~1200	煤岩	92.1	6.8	1.0	0.37
小 12	1641.5	煤岩	82.0	10.0	6.0	0.483
小 12	1367	碳质泥岩	79.0	9.0	12.0	0.475
小 13	1535~1536	碳质泥岩	72.0	8.0	20.0	0.497
小 15	1620.9	煤岩	82.0	6.0	12.0	0.625
欧 6	2154~2184	煤岩	90.7	4.3	5.0	0.47
欧 24	2050~2060	煤岩	87.8	6.5	5.7	0.48

实验研究认为，煤的产烃能力总趋势为稳定组（壳质组）>镜质组>丝质组（惰质组），如在 600℃ 时与产油高峰时，前者产气比例为 2.2:1:0.8，后者产油比例为 9.4:1:0.5，反映出镜质组偏向生气，而壳质组是油气兼生的组分，说明煤系烃源岩有机显微组成决定了有机成因烃类的形成与类型，镜质组和壳质组均应该是煤成烃的重要母质。从图 10 中能够清楚地看出， R_o 值与煤层埋深、煤阶呈正相关关系，东部凹陷烃源岩生烃门限深度平均为 2700m，恰好是褐煤与长焰煤的分界深度，对应的 R_o 为 0.5%，说明研究区内煤系烃源岩演化程度低，总体仍处于未成熟—低成熟阶段。

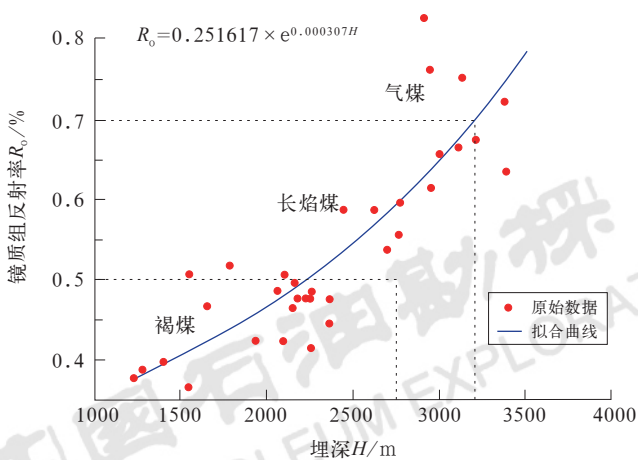


图 10 辽河拗陷东部凹陷煤岩镜质组反射率与埋深关系图
Fig.10 Relationship between vitrinite reflectance and burial depth of coal rocks in Eastern Sag of Liaohe Depression

刘文汇等^[33]认为煤系有机质（包括树脂、木栓质和富氢基质）在 R_o 为 0.3%~0.6% 的低演化阶段，基本上就已经完成了生烃和排烃过程。徐永昌等^[34]发现煤系有机质在 R_o 为 0.4%~0.7% 时即可生成大量以甲烷为主的气体并大范围聚集。徐永昌^[35]等在研究东部凹陷腐殖型有机质生气机制时提出，腐殖型有机质不仅在低演化阶段可以形成生物气，而且可能更有利于在埋深不大、地温不高、有机质成熟度相对低的过渡带形成生物—过渡带气，辽河盆地的生物—过渡带气主要分布在沙三段以上，同时明确指出东部凹陷是寻找生物—过渡带气的有利地区。煤系成因生物气生成模拟实验中，生物甲烷气的生成量和生气速率总体表现为煤阶越低，生气累积量和生气速率越大^[36]。

综合上述分析，可以确定低演化条件下生气是辽河拗陷东部凹陷煤系烃源岩的主要特征，而低演化阶段生成的天然气一般以生物气和生物—过渡带气为主。东部凹陷煤系地层广泛分布，特别是碳质泥岩发育更为广泛，在东部凹陷全区均有分布。而煤系成因生物气一般分布在煤层之间或煤层之上（图 3），烃源岩与储层分布广且接触面积大，有利于形成含煤岩系大中型气田。

3.3 优越的储层条件有利于生物气聚集

东部凹陷不仅具备生物气形成的物质基础，而且在沙三上亚段、沙一段和东营组也不缺乏有效储层。由于埋藏较浅，碎屑岩以细砂岩、中砂岩为

主，粗砂岩、砂砾岩次之，分选中等—好，磨圆度以次圆状为主，石英含量平均为 38.65%，一般在 21.0%~41.2% 之间，杂基含量较少、结构成熟度中等，绝大部分石英源于变质岩和火山岩。成岩作用弱，储层物性较好，砂岩储层孔隙度主要分布在 15%~28% 之间，渗透率一般分布在 10~1000mD 之间（表 4），均为中高孔、中高渗储层，储集条件好，说明生物气成藏不缺乏优质储层。

表 4 辽河拗陷东部凹陷重点地区浅层储层物性表
Table 4 Physical properties of shallow reservoirs in key areas in Eastern Sag of Liaohe Depression

地区	层位	孔隙度 /%			渗透率 /mD		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均
黄金带	Ed	37.6	6.9	17.46	4721	1.1	168
	Es ₁	27.0	3.1	15.04	68	0.5	8
	Es ₃ ¹	26.3	3.9	15.61	689	0.5	94
欧利坨子	Ed	24.6	22.6	23.7	974	72.0	185
	Es ₁	30.0	2.7	19.0	4158	0.5	261
	Es ₃ ¹	32.3	5.7	19.0	2487	0.5	54
热河台	Ed	33.1	19.7	27.9	1447	16.5	424
	Es ₁	35.3	2.2	25.7	57200	0.5	1437
	Es ₃ ¹	33.0	3.9	19.9	6304	0.7	140
于楼	Ed	24.6	14.5	20.4	1131	128.0	476
	Es ₁	29.8	7.8	21.3	20230	0.5	839
	Es ₃ ¹	26.9	6.2	19.14	235	<1	21.1

从目前浅层气分布来看，浅层气藏主要分布在沙三上亚段，例如小龙湾地区的天然气主要分布于煤层上部的砂岩中，具有分布范围广、产能高的特点。其次分布在沙一段厚层泥岩盖层中的薄砂层中，例如欧利坨子地区浅层气，具有气层多、发育稳定、产能稳定的特点。

3.4 多种类型盖层为浅层气保存提供良好保障

封盖层是评价含油气远景的重要因素，直接影响油气的聚集和保存。特别是在构造活动强烈、断裂发育的盆地中，盖层条件的研究更为重要，逐渐成为油气工作者重点研究的一个领域^[37]。

辽河拗陷发育沙三上亚段、沙一段两套区域盖层，它们在东部凹陷、西部凹陷和大民屯凹陷等的发育程度和分布有明显差异。沙一段中部区域盖层在东部凹陷厚度大、分布广，对于浅层气有影响。沙一段属水进期沉积，泥岩质纯且分布广泛，除边缘地区外，

泥岩都很发育，累计厚度为 40~150m，连续厚度也比较大，一般为 20~30m，最厚可达 80m。凹陷中段泥岩连续厚度较大，凹陷南北泥岩盖层变为薄层，与砂岩组成薄互层，封盖条件相对变差。

研究表明辽河拗陷东部凹陷具有良好的泥岩盖层，相较于西部凹陷具有不同的特征，东部凹陷东营组多为薄层泥岩，沙一段多为深湖相和半深湖相泥岩，东部凹陷沙三上亚段为河流沼泽相和浅湖相泥岩。因此沙一段是一套优质的区域盖层，对生物气起到了很好的封盖作用。

3.5 构造晚定型—油气晚期充注有利于浅层气的规模富集

大量研究表明，晚期成藏、晚期充注是生物气成藏的重要特征^[37-40]。晚期成藏对大中型气田的形成具有重大影响。从图 11 可知我国大部分煤成大气田均成藏于新生代，属于晚期成藏^[41]。

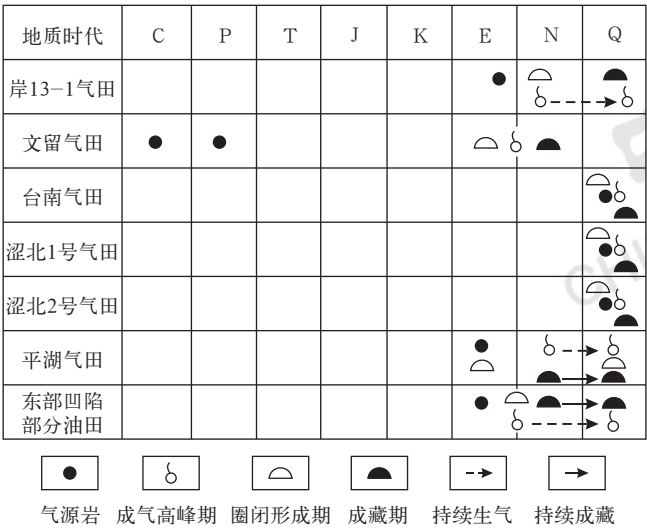


图 11 中国主要煤成大中型气田成藏期

Fig.11 Gas accumulation periods of major large and medium-sized coal derived gas fields in China

东部凹陷具备形成大气田的有利条件，主要有3个方面的原因。

(1) 辽河盆地东部凹陷为伸展和走滑两期构造变形叠加的产物，是具有“下断上拗”双层结构的裂谷系盆地^[15]，东部凹陷受走滑运动影响，盆地整体受挤压作用影响，形成反转构造，形成了中央背斜构造带，圈闭条件非常有利于生物气成藏。

(2) 具有晚生烃、晚充注的特征，晚生烃是指与主力烃源岩相比，生烃相对较晚，煤系成因生物气在东部凹陷主要发育在两个构造带，一是中央背斜构造带，中央背斜构造大部分是先洼后隆的反转构造带，其地层从沙三上亚段开始整体抬升，即从煤系地层开始整体抬升，具有先埋后抬的特点，由于压力降低有利于煤成气的排出，荣兴屯、大平房、桃园、黄金带、欧利坨子、青龙台等浅层气发育区均位于该带。二是在斜坡构造带，煤系地层埋深相对较浅，一般深度在1100~1600m，对应地层深度在50~80℃之间，具备形成生物气的良好环境，而且构造运动相对稳定，特别东营组沉积后期构造基本定型，构造继承性明显。

(3) 构造形成期相对较晚，属于晚期成藏，浅层气发育的中央背斜构造带大约在东营组沉积后期构造定型，东营组沉积后期走滑强度大幅降低，盆地进入萎缩阶段，断层活动微弱，有利于浅层气成藏（图12）。在东部凹陷西侧斜坡带，虽然构造具有一定的继承性，但是由于东营组沉积后期构造活动性大大降低，基本保持了原有构造格局，再加上天然气生成较晚，生气高峰期也自然较晚，加上充注较晚，也可以形成浅层气的发育区，如小龙湾地区生物气就很发育。

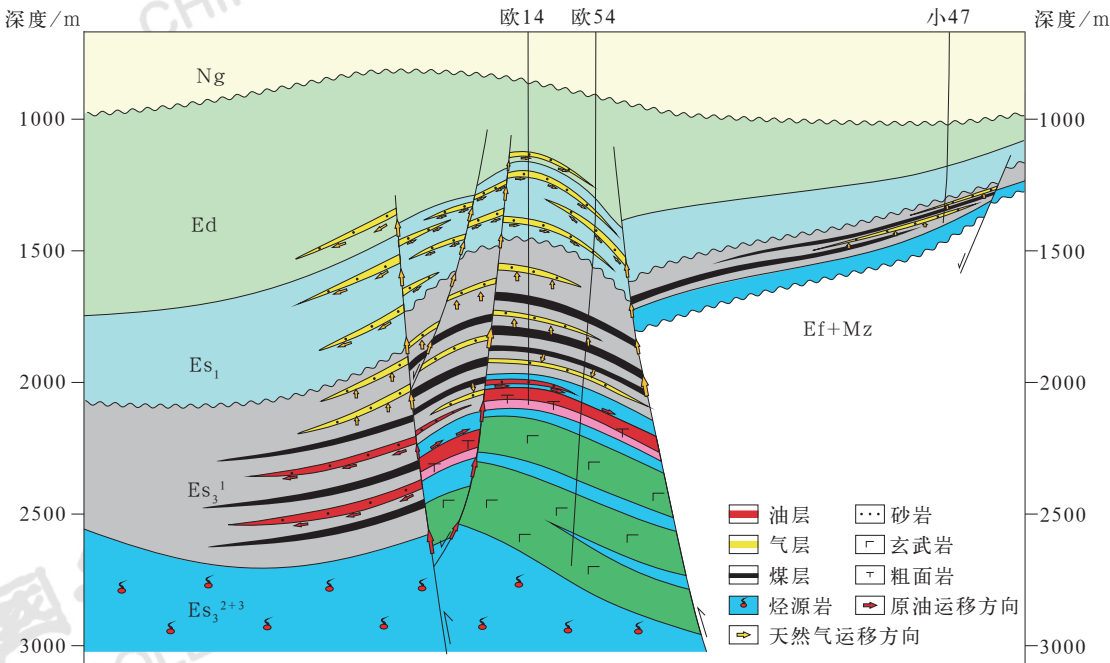


图 12 辽河拗陷东部凹陷浅层生物气成藏模式图

Fig.12 Gas accumulation pattern of shallow biogas in Eastern Sag of Liaohe Depression

4 浅层煤系成因生物气的勘探发现及突破

通过开展浅层气成因研究,确定辽河拗陷东部凹陷生物气以煤系成因为主,从而建立了煤系地层与浅层气的联系,在勘探中主要在煤系地层发育区寻找浅层气。2019年,首先选择煤系地层十分发育的小龙湾地区部署小47井,在沙三上亚段煤系地层砂岩中获得突破,1321~1409m井段试油获 $14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业气流,目前累计生产天然气 $1012 \times 10^4 \text{ m}^3$,打

开了浅层生物气勘探局面。

在摸清浅层煤系成因生物气分布规律的基础上,加强开展老井复查扩大成果,为快速上产提供保障。2021—2022年,在煤系地层发育的欧利坨子地区,采用老井复查和探井部署相结合方式,提出10口老井试气(表5),均获得工业气流,其中欧31-H7井1632.1~1785.3m试气无阻流量初期为 $48 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,当年上报天然气预测地质储量 $208.39 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为老区天然气上产的成功案例。

表5 欧利坨子地区老井投产成果表

Table 5 Production results of old wells in Oulituozi area

井号	层位	井段 /m	初期日产气 / 10^4 m^3	累计产气 / 10^4 m^3
欧26-5-6	Es ₁	1508.2~1564.7	3.4	893.3
欧28-31-21		1716.1~1718.7	1.2	328.0
欧29-新24		1800.0~1805.0	1.9	150.1
欧42-16-18		1884.1~1911.0	3.3	428.9
欧48-22-24		1586.9~1638.5	2.8	752.6
欧48-38-24		1941.9~1946.8	1.2	186.3
欧612		1842.4~1965.8	1.3	423.6
欧31-H7		1632.1~1785.3	7.7	2119.0
欧26-3-7	Es ₃	1776.4~1993.8	2.6	137.0
欧48-28-20		2143.0~2151.0	10.2	388.8

5 结论与认识

(1) 辽河拗陷东部凹陷浅层气具备多种成因,但是总体以煤系成因生物气为主。通过对东部凹陷浅层气地球化学资料研究表明,东部凹陷天然气可以分为4类,即原生生物气、生物—过渡带气(或者称为低熟气)、改造型生物气和混合气,总体来看前3种均可划到煤系成因生物气范畴。

(2) 煤系成因生物气受多种因素控制,煤系地层分布是重要控制因素。东部凹陷浅层生物气分布明显受煤系地层、碎屑岩优质储层及区域性有利封盖层等因素控制,构造晚定型、油气晚期充注成藏有利于形成浅层气的规模富集,煤系成因生物气主要分布在煤系地层发育区。

(3) 老区浅层气勘探依然具有很大的勘探潜力。东部凹陷属于勘探高成熟地区,探井和开发井已经很

多,基本在各个构造带均有分布,但是由于早期勘探主要目的层位为中深层,浅层资料并未录取完整,导致浅层气勘探潜力尚未完全挖掘。该区勘探的成功为类似地区浅层挖潜提供了经验。

参考文献

- [1] 罗海炳,胡英杰,刘兴周,等.辽河拗陷兴隆台潜山中生界地质新认识与油气新发现[J].中国石油勘探,2019,24(4):439-448.
Luo Haibing, Hu Yingjie, Liu Xingzhou, et al. New understanding of Mesozoic geology and new discovery of oil and gas in Xinglongtai buried hill of Liaohe Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 439-448.
- [2] 牛嘉玉,王玉满,谯汉生.中国东部老油田深层油气勘探潜力分析[J].中国石油勘探,2004,9(1):33-40.
Niu Jiayu, Wang Yuman, Qiao Hansheng. Analysis of deep oil and gas exploration potential in old oil areas in eastern China[J]. China Petroleum Exploration, 2004, 9(1): 33-40.
- [3] 胡英杰,蔡国钢,刘兴周,等.辽河拗陷东部滩海深层—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.
- [4] 岳小文, 孔令峰, 刘秀如, 等. 石油公司油气与新能源融合发展路径与实践探索[J]. *石油科技论坛*, 2023,42(2):75–81.
- Yue Xiaowen, Kong Lingfeng, Liu Xiuru, *et al.* Path of oil and gas development in integration with new energy for oil companies and their practice[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2023,42(2):75–81.
- [5] 徐凤银, 云箭, 孟复印. 低碳经济促进天然气与煤层气产业快速发展[J]. *中国石油勘探*, 2011,16(2):6–11,85.
- Xu Fengyin, Yun Jian, Meng Fuyin. Low carbon economy for rapid development of natural gas and coal bed methane industry[J]. *China Petroleum Exploration*, 2011,16(2):6–11,85.
- [6] 李剑, 曾旭, 田继先, 等. 中国陆上大气田成藏主控因素及勘探方向[J]. *中国石油勘探*, 2021,26(6):1–20.
- Li Jian, Zeng Xu, Tian Jixian, *et al.* Main control factors and exploration directions for reservoir formation in Chinese onshore gas fields[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(6):1–20.
- [7] 李先奇, 张水昌, 朱光有, 等. 中国生物成因气的类型划分与研究方向[J]. *天然气地球科学*, 2005,16(4):477–484.
- Li Xianqi, Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, *et al.* Types and research direction of biogenic gas in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005,16(4):477–484.
- [8] 刘文汇. 过渡带天然气地球化学特征[J]. *地球化学*, 1995,24(4):368–378.
- Liu Wenhui. Geochemical characteristics of bio-thermocatalytic transition zone gases in China[J]. *Geochimica*, 1995,24(4):368–378.
- [9] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. *中国科学: B 辑*, 1992,21(2):185–193.
- Dai Jinxing. Identification of various alkane gases[J]. *Science in China: Series B*, 1992,21(2):185–193.
- [10] 陶明信, 王万春, 解光新, 等. 中国部分煤田发现的次生生物成因煤层气[J]. *科学通报*, 2005,50(增刊 1):14–18.
- Tao Mingxin, Wang Wanchun, Xie Guangxin, *et al.* Secondary biogenic coalbed methane found in several coal fields in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005,50(S1):14–18.
- [11] 张小军, 陶明信, 解光新, 等. 淮南煤田次生生物成因气的比例及资源意义[J]. *沉积学报*, 2007,25(2):314–318.
- Zhang Xiaojun, Tao Mingxin, Xie Guangxin, *et al.* Studies on resources significance and mixing proportion of secondary biogenic gas in coalbed gases, Huainan coalfield[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007,25(2):314–318.
- [12] 孙卉, 周旭红, 李军, 等. 辽河盆地东部凹陷浅层气成藏条件及富集规律研究[J]. *天然气地球科学*, 1997,8(2):27–32.
- Sun Hui, Zhou Xuhong, Li Jun, *et al.* Reservoir forming conditions and enrichment regularity of shallow gas field in the Eastern Sag of Liaohe Depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 1997,8(2):27–32.
- [13] 张占文, 李宗飞, 任作伟. 辽河东部凹陷浅层气成藏控制因素[J]. *断块油气田*, 1997,4(6):11–15.
- Zhang Zhanwen, Li Zongfei, Ren Zuowei. Controlling factors of shallow gas accumulation in Liaohe East Depression[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 1997,4(6):11–15.
- [14] 李军, 侯读杰, 李敬含, 等. 辽河拗陷东部凹陷天然气特征及成因[J]. *天然气工业*, 2011,31(2):43–47.
- Li Jun, Hou Dujie, Li Jinghan, *et al.* Geochemical characterization and genetic types of natural gas in the Eastern Sag of Liaohe Depression[J]. *Nature Gas Industry*, 2011,31(2):43–47.
- [15] 李思伟, 黄玉龙, 冯玉辉, 等. 辽河盆地东部凹陷新生代伸展—走滑构造作用及断裂构造特征[J]. *地球物理学报*, 2020,63(2):612–626.
- Li Siwei, Huang Yulong, Feng Yuhui, *et al.* Cenozoic extension and strike-slip tectonics and fault structures in the Eastern Sag, Liaohe Depression[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(2):612–626.
- [16] 张占文, 高庆胜, 吴铁生. 辽河盆地东部凹陷天然气的地球化学特征及成因分类[J]. *天然气地球科学*, 1995,6(2):1–8.
- Zhang Zhanwen, Gao Qingsheng, Wu Tiesheng. Geochemical characteristics and origin of natural gas from the Eastern Sag of Liaohe Depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 1995,6(2):1–8.
- [17] 陈振岩, 余炳俊, 郑治宇, 等. 辽河盆地多源天然气复合成因[J]. *沉积学报*, 1997,15(2):58–62.
- Chen Zhenyan, Yu Bingjun, Zheng Zhiyu, *et al.* The compound origin of polygenic natural gases of the Liaohe Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997,15(2):58–62.
- [18] 李孝甫, 王晓峰, 郑建京, 等. 辽河拗陷东部凹陷低熟气地球化学特征[J]. *天然气地球科学*, 2015,26(7):1365–1375.
- Li Xiaofu, Wang Xiaofeng, Zheng Jianjing, *et al.* Geochemistry of low maturity gases the Eastern Sag of Liaohe Depression, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015,26(7):1365–1375.
- [19] 陈星州, 邵建欣, 孙转, 等. 渤海湾盆地辽河拗陷稠油分布特征及主控因素[J]. *石油实验地质*, 2023,45(2):317–326.
- Chen Xingzhou, Shao Jianxin, Sun Zhuan, *et al.* Characteristics and controlling factors of heavy oil distribution in Liaohe Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023,45(2):317–326.
- [20] 陈践发, 陈振岩, 季东民, 等. 辽河盆地天然气中重烃异常富集重碳同位素的成因探讨[J]. *沉积学报*, 1998,16(2):5–8.
- Chen Jianfa, Chen Zhenyan, Ji Dongmin, *et al.* Discussion about the isotopically heavy ethane & propane in natural gases from Liaohe Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998,16(2):5–8.
- [21] Scott A R, Kaiser W R, Ayers W B, *et al.* Thermogenic and secondary biogenic gases, Sanjuan Basin, Colorado New Mexico—Implication for coalbed gas producibility[J]. *AAPG Bulletin*, 1994,78(8):1168–1209.
- [22] Xu Yongchang, Wang Zhiyong, Wang Xiaofeng, *et al.* Low-mature gases and typical low-mature gas fields in China[J]. *Science in China(Series D:Earth Sciences)*, 2008,51(2):312–320.
- [23] 刚文哲, 高岗, 郝石生, 等. 论乙烷碳同位素在天然气成因类型研究中的应用[J]. *石油实验地质*, 1997,19(2):164–167.
- Gang Wenzhe, Gao Gang, Hao Shisheng, *et al.* Carbon isotope of ethane applied in the analyses of genetic thpes of naturalgas[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1997,19(2):164–167.
- [24] 王晓峰, 徐永昌, 沈平, 等. 低熟气地球化学特征与判识指标[J]. *天然气地球科学*, 2010,21(1):1–6.
- Wang Xiaofeng, Xu Yongchang, Shen Ping, *et al.* Geochemical characteristics and identification indexes of low-mature gases[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010,21(1):1–6.
- [25] 冯剑, 刘清波. 液化天然气(LNG)装置脱汞工艺单元技术最新进展[J]. *科技展望*, 2015,25(32):32–33.
- Feng Jian, Liu Qingbo. The latest development of mercury removal technology unit in liquefied natural gas (LNG) plant[J].

- Science and Technology, 2015,25(32):32-33.
- [26] 冯剑, 刘志, 陈臻. 液化天然气装置脱汞必要性分析[J]. 深冷技术, 2016(5):56-60.
Feng Jian, Liu Zhi, Chen Zhen. Necessity analysis of mercury removal in LNG plant[J]. Cryogenic Technology, 2016(5): 56-60.
- [27] 刘全有, 戴金星, 李剑, 等. 油气中汞的地球化学特征与科学意义[J]. 石油勘探与开发, 2006,33(5):542-547.
Liu Quanyou, Dai Jinxing, Li Jian, *et al.* Geochemical characteristics and scientific significance of mercury in oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006,33(5): 542-547.
- [28] 李广之, 袁子艳, 庄原, 等. 汞元素的石油地质意义[J]. 物探与化探, 2008,32(2):143-146,185.
Li Guangzhi, Yuan Ziyang, Zhuang Yuan, *et al.* Petroleum geological significance of mercury[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008,32(2):143-146,185.
- [29] 戴金星, 戚厚发, 王少昌, 等. 我国煤系的油气地球化学特征、煤成气藏形成条件及资源评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
Dai Jinxing, Qi Houfa, Wang Shaochang, *et al.* Geochemical characteristics of oil and gas in China's coal measures, formation conditions and resource evaluation of coal-formed gas reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [30] 任怀强, 杨勇, 单素红. 煤成气与油型气的地球化学识别方法评述[J]. 西部探矿工程, 2005,17(9):64-66.
Ren Huaiqiang, Yang Yong, Shan Suhong. Review on geochemical identification methods of coal-formed gas and oil-type gas[J]. West-China Exploration Engineering, 2005, 17(9):64-66.
- [31] 韩中喜, 李剑, 严启团, 等. 天然气汞含量作为煤型气和油型气判别指标的探讨[J]. 天然气地球科学, 2013,24(1):129-133.
Han Zhongxi, Li Jian, Yan Qituan, *et al.* Discussion of natural gas mercury content as an identification index of coal type gas and oil type gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2013,24(1): 129-133.
- [32] 吴翔. 辽河盆地东部凹陷沙三上段成煤环境分析[J]. 内蒙古石油化工, 2011,37(6):178-179.
Wu Xiang. Coal-forming environment analysis of the upper member of Shahejie Formation in the Eastern Depression of Liaohe Basin[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2011,37(6):178-179.
- [33] 刘文汇, 徐永昌, 史继扬. 生物—热催化过渡带气[M]. 北京: 科学出版社, 1998:1-67.
Liu Wenhui, Xu Yongchang, Shi Jiyang. Biothermal catalytic transition zone gas[M]. Beijing: Science Press, 1998:1-67.
- [34] 徐永昌, 刘文汇, 沈平. 成岩阶段油气的形成与多阶段连续的天然气成因新模式[J]. 天然气地球科学, 1993,4(6):1-7.
Xu Yongchang, Liu Wenhui, Shen Ping. Formation of oil and gas in diagenetic stage and a new model of multi-stage continuous natural gas genesis[J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 4(6):1-7.
- [35] 徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等. 一种新的天然气成因类型: 生物—热催化过渡带气[J]. 中国科学: B 辑, 1990,19(9):975-980.
Xu Yongchang, Shen Ping, Liu Wenhui, *et al.* A new genetic type of natural gas—bio-thermal catalytic transition zone gas[J]. Science in China: Series B, 1990,19(9):975-980.
- [36] 邵培, 王爱宽, 王文峰. 中低煤阶煤的生物气生成特征[J]. 煤炭科学技术, 2016,44(10):65-69.
Shao Pei, Wang Aikuan, Wang Wenfeng. Biogas formation features of low and medium rank coal[J]. Coal Science and Technology, 2016,44(10):65-69.
- [37] 张占文, 陈永成. 辽河盆地东部凹陷天然气盖层评价[J]. 沉积学报, 1996,14(4):103-108.
Zhang Zhanwen, Chen Yongcheng. Evaluation of natural gas caprock in Eastern Depression of Liaohe Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996,14(4):103-108.
- [38] 张占文, 程敏, 陈永成. 辽河盆地地层流体超压体系特点及封盖能力[J]. 断块油气田, 1999,6(1):13-16.
Zhang Zhanwen, Cheng Min, Chen Yongcheng. Characteristics and sealing capacity of formation fluid overpressure system in Liaohe Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1999,6(1):13-16.
- [39] 高阳, 金强, 帅燕华. 渤海湾盆地生物气成因类型与成藏条件[J]. 天然气地球科学, 2011,22(3):407-414.
Gao Yang, Jin Qiang, Shuai Yanhua. Genetic types and accumulation conditions of biogas in Bohaiwan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011,22(3):407-414.
- [40] 帅燕华, 张永昌, 苏爱国, 等. 生物成因天然气勘探前景初步分析[J]. 天然气工业, 2006,26(8):1-4.
Shuai Yanhua, Zhang Shuichang, Su Aiguo, *et al.* Preliminary analysis of exploration potential of biogenetic gas[J]. Natural Gas Industry, 2006,26(8):1-4.
- [41] 戚厚发, 孔志平, 戴金星, 等. 我国较大气田形成及富集条件分析[C]// 宝石. 天然气地质研究. 北京: 石油工业出版社, 1992:8-14.
Qi Houfa, Kong Zhiping, Dai Jinxing, *et al.* Analysis of formation and enrichment conditions of relatively large gas fields in China [C]// Shi Baoheng. Geological research of natural gas. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992:8-14.