

## 鄂尔多斯盆地海相天然气来源及勘探启示

帅燕华<sup>1</sup>,刘新社<sup>2</sup>,李 剑<sup>1</sup>,米敬奎<sup>1</sup>,胡国艺<sup>1</sup>,孔庆芬<sup>2</sup>

(1. 中国石油 勘探开发研究院,北京 100083;2. 中国石油 长庆油田公司 勘探开发研究院,陕西 西安 710061)

**摘要:**鄂尔多斯盆地海相天然气发现点多但零散,探明储量整体规模相对较小,与海相层系研究程度浅、成藏认识存在较大分歧密切相关。基于天然气分子内同位素特征,综合对比盆地上、下古生界天然气地球化学特征及地质条件,结果发现:① 乌审旗古隆起东部奥陶系盐下马家沟组四段天然气为典型原油裂解气,普遍经历了不同程度的硫酸盐热化学还原作用(TSR),湿气组分被强烈氧化导致碳同位素偏重。然而,与中、西部地区相比,该区工业生产井甲烷( $C_1$ )碳同位素普遍偏轻( $\delta^{13}C_1 < -40\%$ ),与马家沟组烃源岩干酪根碳同位素偏重( $\delta^{13}C$ 平均值为 $-27\%$ ~ $-26\%$ )不相匹配,推测有深部烃源岩(长城系—寒武系)的补充贡献。深大断裂输导是富集高产的必要条件,具多层系立体成藏模式,古老地层应发育古油气藏。② 盆地南部寒武系—奥陶系天然气分子内同位素特征指示其为典型油型气来源,以古老烃源(长城系和寒武系源)贡献为主,而非“上生下储”式煤成气或混合来源。③ 此类天然气广泛分布于宜川、黄陵、延安至靖边气田南部和靖西地区,靖边气田中部部分井也显示其突出贡献。源自长城系和寒武系的天然气在鄂尔多斯盆地分布广泛,是中国乃至全球为数不多证实可能有长城系源岩贡献的潜在气区。

**关键词:**成藏模式;分子内同位素;油型气;马家沟组;奥陶系;海相;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

## Sources of marine natural gas in the Ordos Basin and implications for exploration

SHUAI Yanhua<sup>1</sup>, LIU Xinshe<sup>2</sup>, LI Jian<sup>1</sup>, MI Jingkui<sup>1</sup>, HU Guoyi<sup>1</sup>, KONG Qingfen<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration &amp; Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

**Abstract:** Numerous scattered marine natural gas discoveries have been reported in the Ordos Basin; however, these discoveries generally exhibit relatively small proven reserves. This situation is closely linked to both the limited research on marine sequences and the substantially diverging understanding of gas accumulation mechanisms within the basin. Based on the intramolecular isotopic characteristics of natural gas, this study presents a systematic comparison of the geochemical characteristics and geological conditions of the Upper and Lower Paleozoic natural gas in the basin. The results indicate that natural gas from the 4th member of the Ordovician subsalt Majiagou Formation in the eastern Wushenqi paleo-uplift is typical crude oil-cracking gas. This gas generally experienced thermochemical sulfate reduction (TSR) to varying degrees during its accumulation, with the wet gas components exhibiting relatively heavy carbon isotopes due to intense oxidation. However, compared to the west-central Ordos Basin, the eastern Wushenqi paleo-uplift generally shows lighter methane carbon isotopic compositions ( $\delta^{13}C_1 < -40\%$ ) in industrial production wells. This characteristic is inconsistent with the relatively heavy carbon isotopes (average  $\delta^{13}C$  of  $-27\%$  ~  $-26\%$ ) of kerogen in the source rocks of the Majiagou Formation, suggesting additional gas contributions from deep source rocks (the Cambrian to Changchengian source rocks) to the natural gas in subsalt strata of the Majiagou Formation. In the eastern Wushenqi paleo-uplift, the presence of deep-seated faults is necessary for natural gas enrichment and high yield, and a multi-sequence stereoscopic gas accumulation pattern is identified, implying the development of paleo-hydrocarbon reservoirs in ancient strata. Intramolecular isotopic characteristics indicate that the Cambrian-Ordovician

收稿日期:2025-10-11;修回日期:2026-05-15。

第一作者简介:帅燕华(1971—),女,教授级高级工程师,地球化学。E-mail: yhshuai@petrochina.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42272139);中国石油天然气股份有限公司科技重大项目(2023ZZ0203, 2021DJ0604)。

natural gas in the southern Ordos Basin is typical oil-associated gas. Such natural gas is predominantly derived from ancient (Changchengian/Cambrian) source rocks, rather than from coal-derived gas of an upper source rock - lower reservoir configuration or from mixed sources. This gas is extensively distributed from the Yichuan, Huangling, and Yan'an areas to the southern and western parts of the Jingbian gas field and is even widely identified in several wells in the central Jingbian gas field. The results of this study reveal that natural gas sourced from the Changchengian/Cambrian source rocks is extensively distributed across the Ordos Basin, establishing this basin as a rare potential gas province with confirmed possible contributions from the Changchengian source rocks in China and even worldwide.

**Key words:** gas accumulation mode, intramolecular isotope, oil-type gas, Majiagou Formation, Ordovician, marine facies, Ordos Basin

引用格式:帅燕华,刘新社,李剑,等. 鄂尔多斯盆地海相天然气来源及勘探启示[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(4): 1194-1212. DOI: 10. 11743/ogg20260409.

SHUAI Yanhua, LIU Xinshe, LI Jian, et al. Sources of marine natural gas in the Ordos Basin and implications for exploration [J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(4): 1194-1212. DOI: 10. 11743/ogg20260409.

与四川盆地和塔里木盆地等海相天然气资源丰富的地区相比<sup>[1]</sup>,鄂尔多斯盆地已探明的海相油型气规模相对较小,目前主要突破体现在靖边气田马家沟组风化壳气藏。近期,在中-上奥陶统乌拉力克组页岩油气、奥陶系马家沟组盐下[马(马家沟组)四段和马五<sup>6-10</sup>亚段]和南部寒武系-奥陶系风化壳等几大领域有了较大发现<sup>[2]</sup>。对于后两个领域天然气的来源及成藏机制,目前仍存在较大争议<sup>[3-14]</sup>:天然气究竟来自上古生界煤系烃源岩,还是下古生界海相烃源岩? 下古生界烃源岩是以奥陶系马家沟组为主,还是存在更古老的长城系-寒武系的贡献? 天然气是否以原油裂解气为主? 其成藏机制如何? 这些问题的厘清直接关系到下一步勘探部署决策,是保障勘探发现、降低投资风险的重要基础。

这些基础问题尚未解决,主要缘于整体研究程度相对较浅。与四川盆地和塔里木盆地深层发育寒武系优质烃源岩不同,鄂尔多斯盆地在寒武系沉积期,盆地内部为低隆区,处于边缘相,缺乏深水沉积和优质烃源岩<sup>[15]</sup>。盆地内已揭示的长城系烃源岩分布较为局限,且长城系及更老地层来源的规模油气藏在中国尚未取得重大发现,即便在全球范围内也属罕见<sup>[16]</sup>。这些因素使得勘探界对该盆地深层资源潜力普遍持谨慎态度。此外,该盆地上古生界天然气资源极为丰富,已探明储量近 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,近期煤岩气勘探开发也进展迅速<sup>[17]</sup>,这在主观上降低了对海相天然气这一后备资源需求的紧迫性,导致除靖边气田外,盆地海相层系的勘探投入整体相对不足。上述因素共同制约了该盆地海相领域的研究进展,亟待开展系统性综合分析,以明确其资源潜力与勘探方向。

在钻井资料不足的情况下,对深层烃源岩发育状况的预测更多依赖于宏观沉积构造演化历史的恢复。

然而,由此获得的信息较为粗略,难以直接支撑勘探决策。天然气作为烃源岩的产物,能够客观、真实地反映烃源岩特征和生排烃历史,因此在理想情况下应是烃源岩的‘代言人’。然而,在深层-超深层领域,有效的烃源示踪手段依然欠缺。高-过成熟天然气中乙烷等重烃组分含量急剧减少,甲烷占据了烷烃气的主体(甲烷含量 $> 95\%$ ),导致天然气常规特征逐渐趋于一致,区分度下降。加之深层古老层系中天然气成藏过程复杂、历史漫长,可能经历运移、扩散、化学氧化[包括硫酸盐热化学还原作用(TSR)]等一种或多种次生作用,发生不同程度的物理或化学分馏,进一步增加了研究难度,常规技术方法已难以有效应对。

近年来,天然气分子内同位素技术发展迅速。该技术可用于标定物质来源、揭示反应机理、路径和平衡温度<sup>[18-19]</sup>。在区分热成因气与无机气、反映天然气成熟度、识别微生物作用及化学降解与同位素交换过程等方面都展现出应用潜力<sup>[18-20]</sup>。将其与常规地球化学特征(如组分和同位素)相结合,能够较好地揭示天然气生成机制与所经历的次生作用<sup>[20]</sup>,从而在很大程度上弥补当前研究手段的不足。

本文基于鄂尔多斯盆地典型气藏天然气分子内同位素特征,结合各勘探领域及上古生界已有天然气常规地球化学特征数据对比,提出了对海相地层天然气气源与成藏机制的新认识。本项研究是新、老技术成功结合以解决疑难问题的例证,旨在为该区油气勘探提供新的思路,并为类似地区的相关研究提供借鉴。

## 1 海相油型气勘探现状

鄂尔多斯盆地海相地层勘探突破始于1988年,在

SC1井奥陶系马家沟组风化壳获得无阻流量  $28 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,由此发现了靖边气田。这也是中国首次在海相碳酸盐岩地层中发现隐蔽型岩溶古地貌气藏。截至2020年,靖边气田地质储量已达近  $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。该气藏的气源普遍被认为以上古生界煤成气为主、部分并存在下古生界海相油型气的补充。

奥陶系马家沟组盐下首次突破于2013年,Ta38井在马五<sup>6</sup>亚段获  $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流;2015年,T74井在马五<sup>9</sup>亚段获  $128 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产气流;2021年,MT1井在马四段获  $35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的无阻流量。目前,马家沟组盐下有几十口井获工业气流,但整体上分布仍较为分散,缺乏整装规模储量的发现。这类天然气藏目前普遍被认为是盐下自生自储型(东部)和混合型(中西部存在上古生界煤成气混入)。近年来,在盆地西缘中奥陶统乌拉力克组页岩中也取得了油气突破,说明该区中-上奥陶统应发育好的泥页岩型源岩。

中、新元古界-寒武系的突破井主要集中于盆地南缘和北缘。目前,整个盆地钻遇中元古界长城系的井仅7口,其中JT1井在长城系试气点火成功<sup>[21]</sup>。盆地北部伊盟隆起J13井(埋深3 527~3 530 m)获天然气流  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,但该气来源尚不明确,目前被认为是煤成气,原因在于长城系砂岩储层与二叠系煤层直接接触<sup>[22]</sup>。盆地内钻遇寒武系的井,共计103口,大多为兼探井,其中多口井见气显示,主要集中在盆地南部:2015年,庆阳地区L18井在寒武系三山子组岩溶缝洞型白云岩储层获  $11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流;2020年,L51井又获  $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的无阻流量。截至目前,庆阳地区已有10余口井在寒武系获工业气流。

## 2 鄂尔多斯盆地海相烃源岩特征与分布

鄂尔多斯盆地发育多套海相烃源岩,具有一定规模的包括:长城系4套黑色泥页岩、下寒武统徐庄组和东坡组页岩、中-下奥陶统马家沟组盐间泥页岩以及中-上奥陶统乌拉力克组(相当于南部平凉组)一克里摩里组页岩<sup>[1, 3, 7, 12, 15-16, 21-32]</sup>。从分布范围来看,盆地西缘和南缘多套烃源岩均有分布;盆地中主要发育长城系烃源岩和奥陶系马家沟组烃源岩;盆地东部除发育马家沟组烃源岩外,寒武系或长城系烃源岩也有分布。

### 2.1 长城系烃源岩

长城系发育了白草坪组、北大尖组和崔庄组3套烃源岩,岩性主要为泥页岩与泥板岩。目前,在盆地内

多处区域已发现了这些烃源岩的踪迹。在北部白云鄂博地区固阳北和河湾等露头区,渣尔泰群黑色板岩总有机碳含量(TOC)介于1.0%~8.0%,最高可达17.0%,厚度大<sup>[33]</sup>、成熟度高,镜质体反射率( $R_o$ )为2.2%~8.7%。在盆地中部,Ta59井(埋深4 580.0~4 657.2 m)钻遇长城系超过77.2 m厚的暗色泥板岩,TOC介于1.0%~5.5%<sup>[23]</sup>。赵文智等对该井长城系约3 m厚的黑色泥岩(岩屑样品)分析显示,TOC均介于3.0%~5.0%,等效镜质体反射率( $E_qVR_o$ )为1.8%~2.2%<sup>[34]</sup>。盆地南缘崔庄组TOC有所降低<sup>[29]</sup>,山西永济剖面发现厚度为20 m的瀉湖相黑色泥页岩,TOC最高为1.4%,超过40%的样品TOC大于0.5%。洛南泥岩厚度达30 m,TOC最高为1.8%<sup>[23]</sup>。JT1井泥岩TOC最高为1.0%<sup>[16]</sup>。总体而言,长城系烃源岩在盆地内围绕几大裂隙槽广泛分布。然而,不同研究者对于裂隙槽的具体范围认知存在分歧<sup>[16, 21, 23, 35]</sup>,这种认知差异甚至延伸到了长城系的地层展布方面,以乌审旗古隆起以东地区为例,关于该区域是否发育长城系地层,学界至今仍存在争议<sup>[7, 21, 34]</sup>。

盆地南部崔庄组烃源岩干酪根稳定碳同位素比值( $\delta^{13}\text{C}$ )介于-32.5‰~-31.3‰,平均值为-32.1‰;白草坪组底部干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 为-31.5‰<sup>[29]</sup>。在盆地北部固阳北地区,长城系干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 介于-29.6‰~-28.9‰,平均值为-29.5‰<sup>[36]</sup>。

### 2.2 寒武系烃源岩

寒武纪大陆裂谷主要发育在盆地西缘和南缘,为被动大陆边缘,呈“L”型展布,地层厚度一般为400~800 m,最高可达900 m以上<sup>[16, 28, 34-35, 37-39]</sup>。东部神木地区可能存在东部裂谷延入,沉积厚度为200~400 m<sup>[28, 38]</sup>。

烃源岩主要发育于下寒武统东坡组,分布于盆地南缘、西缘和东缘,盆地内部不发育<sup>[15]</sup>。在盆地南缘,岩性主要为页岩和泥板岩,厚度介于2~80 m,TOC介于0.1%~13.8%,平均值为3.3%<sup>[15, 28]</sup>。其中,周家河剖面东坡组页岩累计厚度达60 m,TOC介于0.2%~9.7%,平均值为2.5%;洛南后碛村剖面黑色泥板岩TOC介于0.1%~11.3%,平均值为1.1%。有机质类型以Ⅱ<sub>2</sub>型为主,部分为Ⅰ型。烃源岩热演化程度高, $R_o$ 介于2.3%~2.7%<sup>[15, 28, 40]</sup>。

东坡组烃源岩干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 为-31.6‰~-27.4‰(平均值为-29.3‰)<sup>[29]</sup>,与四川盆地和塔里木盆地寒武统干酪根碳同位素值普遍极端负漂(介于-37.0‰~-30.0‰,平均值为-32.9‰)的特征存在差异,这可能跟该区已发现烃源岩的整体质量略差有关。

### 2.3 奥陶系烃源岩

盆地内已查明中-下奥陶统马家沟组盐湖相烃源岩和上统乌拉力克组-克里摩里组泥页岩两套烃源岩。

马家沟组是一套海相碳酸盐岩与蒸发岩互层沉积烃源岩,主要分布在盆地东部和西部<sup>[8, 11, 23, 25]</sup>,中央古隆起区发育程度弱。其中,盐间薄层泥质岩属优质烃源岩,有机质丰度高,*TOC*介于2.2%~3.6%;有机质类型好(I-II<sub>A</sub>型),以腐泥无定形为主,生烃母质主要为浮游藻类<sup>[25]</sup>。单层厚度极薄,T112井马家沟组超500.0 m取心段仅检测到厚5.6 m的泥质岩,Sh473井泥质岩累厚9.1 m<sup>[25]</sup>。除了薄层泥质岩外,黑灰色白云岩也可能具备生烃供烃能力,平均*TOC*为0.2%,厚度为30.0~80.0 m<sup>[25]</sup>。近期在马四段还发现了厚度为2.0~6.0 m的藻纹层灰岩和云岩,有机质丰度较高,平均*TOC*为1.0%<sup>[27]</sup>。盐下烃源岩干酪根碳同位素普遍偏重(表1), $\delta^{13}\text{C}$ 整体介于-29.3‰~-22.3‰,平均值为-26.3‰<sup>[8, 13]</sup>。其中马五段泥岩干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 主体分布在-28.0‰~-25.0‰,平均值为-27.0‰<sup>[6]</sup>。

乌拉力克组-克里摩里组页岩是另一套中等-优质烃源岩,厚度介于100.0~200.0 m,主要分布于盆地西缘,盆地内部缺失<sup>[16, 23]</sup>。*TOC*变化较大,介于0.1%~4.6%,平均值为1.5%。*R<sub>o</sub>*介于1.3%~2.0%,平均值为1.6%<sup>[31]</sup>。干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 介于-32.1‰~-28.0‰,平均值为-28.5‰。

## 3 数据筛选

基于典型气藏乙烷和丙烷分子内同位素特征<sup>[18-19]</sup>,对比分析了常规地球化学特征数据,同时收集并参考了盆地西部中奥陶统页岩气及部分上古生界天然气的相关地球化学数据。

需要说明的是,在收集的部分井天然气常规地化数据中,不同学者的分析结果存在一定差异。这种现象在地球化学研究中较为常见,可能由多种因素导致。现将其主要影响因素逐一分析如下,以提请未来研究者在利用天然气数据时加以注意。

### 3.1 天然气采集时间和样式差异

样品可能采集于钻探过程中的泥浆脱气阶段或试气阶段,也可能采集于生产井不同生产时期。由于钻采过程各种因素的影响,泥浆气或试采气稳定性不好,组分和同位素均可能与地层真实情况存在偏差。因此,在条件允许时,建议优先采用生产井样品,而非试气样品。然而,对于许多探井,由于产量低或不产气,试气样品往往是唯一可获得的宝贵资料,此类数据在使用时应尤为谨慎。此外,即使同一口生产井,在不同开采时期采集的天然气特征也可能有所差异。

### 3.2 气样集采与保存方式不同

常用的采样容器包括高压钢瓶、气袋和玻璃瓶。其中,采用排水集气法的玻璃瓶保存效果最差、保存时间最短,易导致气体组分和同位素值显著偏离真实值;

表1 鄂尔多斯盆地海相烃源岩特征与分布

Table 1 Characteristics and distribution of marine source rocks in the Ordos Basin

| 层位  | 发现地区、井号   | TOC/%    | 厚度/m           | R <sub>0</sub> /%   | 干酪根δ <sup>13</sup> C /‰ | 预测分布区域              | 参考文献          |                        |
|-----|-----------|----------|----------------|---------------------|-------------------------|---------------------|---------------|------------------------|
| 长城系 | 渣尔泰群      | 盆地北缘     | 0.5 ~ 11.1/5.7 | —                   | 2.2 ~ 8.7/3.5           | —                   | 盆地北部          | 文献[24, 28, 33]         |
|     | 崔庄组       | 庆阳地区     | 0.5 ~ 17.0/5.0 | 20.0 ~ 140.0/80.0   | 2.3 ~ 3.5/2.9           | -29.5 ~ -32.1/-30.3 | 全盆地           | 文献[16, 23, 29, 33, 36] |
|     | 北大尖组      | T59井     | 3.0 ~ 5.0/4.0  | —                   | 1.8 ~ 2.2/2.0           | —                   | 定边地区          | 文献[21, 34]             |
|     | 白草坪组      | T59井     | —              | —                   | —                       | —                   | 定边地区          |                        |
| 寒武系 | 东坡组       | 洛南县      | 0.5 ~ 13.8/2.5 | 20.0 ~ 80.0/50.0    | 2.3 ~ 3.2/2.8           | -31.6 ~ -27.4/-29.3 | 盆地南缘、西缘和东缘    | 文献[15, 28-29]          |
| 奥陶系 | 马家沟组      | 乌审旗古隆起周边 | 2.2 ~ 3.6/2.8  | 5.0 ~ 10.0/8.0      | 1.7 ~ 2.5/2.1           | -29.3 ~ -22.3/-26.3 | 乌审旗古隆起周边、盆地南缘 | 文献[8, 13, 23, 25-27]   |
|     | 乌拉力克组/平凉组 | 西环凹陷     | 0.5 ~ 4.6/1.5  | 100.0 ~ 200.0/150.0 | 1.3 ~ 2.0/1.7           | -32.1 ~ -23.4/-28.3 | 天环凹陷          | 文献[2-4]                |

注:*TOC*. 总有机碳含量;*R<sub>o</sub>*. 镜质体反射率; $\delta^{13}\text{C}$ . 稳定碳同位素比值。表中数据格式为“最小值~最大值/平均值”;“—”表示无数据。

气袋通常可在15~30 d内保持样品基本稳定,若时间更长可能会发生组分变化或碳同位素值偏重等现象;高压钢瓶的保存效果最佳,样品可稳定保存10 a以上而无显著变化。但需注意,对于含H<sub>2</sub>S的天然气,若使用普通钢瓶储存,H<sub>2</sub>S可能与钢瓶内壁发生反应生成H<sub>2</sub>,从而严重影响H<sub>2</sub>S和H<sub>2</sub>的真实含量分析,这对当前H<sub>2</sub>资源等热点研究领域的影响尤为突出。

### 3.3 不同实验室之间系统误差

按照行业规范,各实验室之间的系统差异应控制在允许的误差范围内。然而,部分实验室可能未定期参与行业组织的比对实验,导致实际分析结果存在不一致的情况。尤其是对于高-过成熟天然气,其湿气组分含量低,分析测试难度大,不同实验室的结果差

异可能显著超出正常误差范围。尽管如此,同一实验室分析的样品数据通常具有较好的系统可比性。

## 4 东部奥陶系马家沟组盐下天然气成藏特征

截至2024年,马家沟组勘探已在马四段和马五<sup>5-10</sup>亚段取得突破,马三段也于个别井见到天然气显示。

### 4.1 天然气特征

东部马家沟组盐下天然气特征变化较大:干燥系数[C<sub>1</sub>/(C<sub>2</sub>+C<sub>3</sub>)]含量比值,其中C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>和C<sub>3</sub>分别代表甲烷、乙烷和丙烷]从7.0~193.0均有分布。普遍含有数量不等的H<sub>2</sub>S,其中Sh85井含量高达26%。烷烃气

表2 鄂尔多斯盆地东部下古生界马家沟组盐下天然气地球化学特征<sup>[3, 6, 8, 41-42]</sup>

Table 2 Geochemical characteristics of natural gas in subsalt strata of the Lower Paleozoic Majiagou Formation, eastern Ordos

Basin<sup>[3, 6, 8, 41-42]</sup>

| 气藏、地区     | 井号    | 层位                                 | 天然气组分含量/%       |                               |                               |                                 |                                 |                |                 |                  | 天然气组分δ <sup>13</sup> C/‰ |                               |                               |                                |
|-----------|-------|------------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------|-----------------|------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|           |       |                                    | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | N <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S | CH <sub>4</sub>          | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> |
| 东部神木—榆林地区 | LT1   | O <sub>1</sub> m <sup>5(5-7)</sup> | 92.46           | 2.79                          | 0.45                          | 0.18                            | 0.10                            | 3.90           | —               | —                | -39.3                    | -23.4                         | -19.7                         | —                              |
|           | S97   | O <sub>1</sub> m <sup>5(6-7)</sup> | 70.85           | 7.31                          | 3.30                          | —                               | —                               | 6.85           | 9.77            | —                | -45.9                    | -31.1                         | -28.5                         | -27.5                          |
|           | S97   | O <sub>1</sub> m <sup>5(4-5)</sup> | 65.77           | 6.74                          | 3.30                          | —                               | —                               | 10.06          | 12.23           | —                | -45.8                    | -31.9                         | -29.5                         | -28.0                          |
|           | S99   | O <sub>1</sub> m <sup>5(5)</sup>   | 81.17           | 7.94                          | 3.85                          | —                               | —                               | 3.32           | 1.17            | —                | -43.5                    | -31.4                         | -28.9                         | -28.2                          |
|           | S107  | O <sub>1</sub> m <sup>5(5)</sup>   | 95.25           | 1.94                          | 0.52                          | 0.16                            | 0.29                            | 0.60           | 0.90            | —                | -41.6                    | -27.2                         | -23.6                         | -24.4                          |
|           | S97   | O <sub>1</sub> m <sup>5(6-9)</sup> | 95.06           | 3.34                          | 0.56                          | 0.12                            | 0.12                            | 0.09           | 0.68            | —                | -36.3                    | -25.7                         | -24.4                         | —                              |
|           | S99   | O <sub>1</sub> m <sup>5(6-5)</sup> | 95.15           | 3.58                          | 0.62                          | 0.17                            | 0.18                            | 0.05           | 0.23            | —                | -36.6                    | -25.7                         | -24.1                         | —                              |
|           | M104  | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>      | 45.36           | 1.00                          | 0.24                          | 0.12                            | 0.06                            | 52.05          | 0.32            | —                | -42.3                    | -25.4                         | -20.5                         | —                              |
|           | MT1   | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>      | 93.25           | 3.08                          | 0.97                          | 0.53                            | 0.31                            | 0.86           | 0.52            | 5.01             | -44.8                    | -27.7                         | -25.1                         | —                              |
|           | GP1H  | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>      | 30.73           | 3.25                          | 1.09                          | 0.31                            | 0.29                            | 29.84          | 31.11           | 3.00             | -42.6                    | -30.3                         | -27.8                         | —                              |
|           | GP1   | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>      | 80.64           | 0.48                          | 0.18                          | —                               | —                               | 0.07           | 0.11            | —                | -43.7                    | -31.1                         | -28.8                         | —                              |
|           | MT6   | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>      | 92.00           | 3.46                          | 1.15                          | 0.63                            | 0.38                            | 1.51           | 0.27            | 4.86             | -39.1                    | -24.7                         | —                             | —                              |
|           | M172  | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>      | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                           | n. d.                           | n. d.          | n. d.           | n. d.            | -37.9                    | —                             | —                             | —                              |
|           | M90   | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>      | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                           | n. d.                           | n. d.          | n. d.           | n. d.            | -39.0                    | —                             | —                             | —                              |
|           | T106  | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>      | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                           | n. d.                           | n. d.          | n. d.           | n. d.            | -37.2                    | —                             | —                             | —                              |
|           | SH85  | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>      | 92.44           | 0.29                          | 0.19                          | 0.13                            | 0.06                            | 4.98           | 1.79            | 26.18            | -41.7                    | -20.8                         | -15.0                         | —                              |
|           | SH168 | O <sub>1</sub> m <sup>2</sup>      | 94.61           | 1.34                          | 0.13                          | 0.01                            | 0.01                            | —              | 1.32            | 2.50             | -38.6                    | -24.2                         | -21.6                         | —                              |
|           | YY1   | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>      | 93.13           | 0.32                          | 0.08                          | 0.08                            | 0.03                            | 5.75           | 0.52            | 10.62            | -40.4                    | -21.5                         | -17.9                         | —                              |
|           | T52   | O <sub>1</sub> m <sup>5(10)</sup>  | 92.12           | 4.81                          | 1.64                          | —                               | —                               | 1.27           | 0.15            | —                | -42.1                    | -26.2                         | -24.6                         | -24.1                          |
|           | T51   | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>      | 91.04           | 4.75                          | 2.04                          | —                               | —                               | 1.95           | 0.21            | —                | -41.7                    | -25.8                         | -24.6                         | —                              |
|           | T90   | O <sub>1</sub> m <sup>3</sup>      | 97.86           | 1.33                          | 0.18                          | 0.05                            | 0.03                            | 0.33           | 0.20            | —                | -40.5                    | -29.2                         | -24.1                         | —                              |
| 延川南气田     | T36   | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>      | 82.24           | 0.04                          | 0                             | 0                               | —                               | 6.22           | 11.49           | —                | -37.3                    | -33.0                         | -25.8                         | —                              |
|           | T37   | O <sub>1</sub> m <sup>5(10)</sup>  | 88.05           | 0.08                          | 0.01                          | 0.01                            | —                               | 5.67           | 6.17            | —                | -38.2                    | -30.7                         | -20.0                         | -17.4                          |
|           | JS-15 | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>   | 96.96           | 0.16                          | 0.06                          | 0                               | —                               | 0.24           | 2.57            | 0.01             | -42.2                    | -33.7                         | -30.5                         | -24.3                          |
|           | JS-3  | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>   | 96.03           | 0.46                          | 0.12                          | 0.03                            | —                               | 0.31           | 3.01            | 0.05             | -40.8                    | -34.2                         | -29.8                         | -23.9                          |
|           | JS-13 | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>   | 93.03           | 0.16                          | 0.08                          | 0.02                            | —                               | 0.43           | 6.19            | 0.09             | -41.3                    | -32.6                         | -30.2                         | -22.9                          |
|           | JS-8  | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>   | 94.20           | 1.67                          | 0.37                          | 0.19                            | —                               | 0.33           | 3.24            | 0                | -40.1                    | -35.9                         | -31.4                         | -25.6                          |
|           | JS-23 | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>   | 93.90           | 0.96                          | 0.32                          | 0.14                            | —                               | 0.22           | 4.13            | 0.34             | -41.2                    | -34.1                         | -28.9                         | -24.1                          |
|           | JS-16 | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>   | 96.10           | 0.20                          | 0.05                          | 0.04                            | —                               | 0.69           | 2.78            | 0.15             | -40.3                    | -34.5                         | -29.9                         | -25.2                          |
|           | JS-6  | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>   | 95.10           | 1.83                          | 0.16                          | 0.01                            | —                               | 0.40           | 2.29            | 0.37             | -42.3                    | -34.8                         | -28.1                         | -24.9                          |
|           | JS-14 | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>   | 95.50           | 1.21                          | 0.13                          | 0.01                            | —                               | 0.28           | 2.58            | 0.15             | -43.0                    | -34.1                         | -28.0                         | -26.9                          |
|           | JS-7  | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>   | 94.30           | 0.46                          | 0.14                          | 0.03                            | —                               | 0.46           | 4.37            | 0.24             | -40.6                    | -33.5                         | -27.3                         | -22.8                          |

注:δ<sup>13</sup>C: 稳定碳同位素比值;CH<sub>4</sub>: 甲烷;C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>: 乙烷;C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>: 丙烷;iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>: 异丁烷;nC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>: 正丁烷;N<sub>2</sub>: 氮气;CO<sub>2</sub>: 二氧化碳。O<sub>1</sub>m<sup>4</sup>: 马家沟组四段;O<sub>1</sub>m<sup>5(5-7)</sup>: 马家沟组五<sup>5-7</sup>亚段;O<sub>1</sub>m<sup>5(10)</sup>: 马家沟组五<sup>10</sup>亚段;其他地层代号类似。“n. d.”表示未检测数据;“—”表示样品中不含该组分。

组分碳同位素值呈正序分布( $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$ ),但变化大。甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 $-44.0\text{‰} \sim -37.0\text{‰}$ ,工业性生产井样品的普遍较轻(多 $< -40.0\text{‰}$ ,集中在 $-44.0\text{‰} \sim -40.0\text{‰}$ );乙烷 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 $-32.0\text{‰} \sim -20.0\text{‰}$ ;丙烷 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 $-30.0\text{‰} \sim -15.0\text{‰}$ (表2)。H<sub>2</sub>S的硫同位素较重, $\delta^{34}\text{S}$ 介于 $20\text{‰} \sim 27\text{‰}$ ,与马家沟组盐下硫酸盐矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ ( $26\text{‰}$ )相近<sup>[8]</sup>,证实其来源于TSR反应。CO<sub>2</sub>同位素数据较少,Shu168井马二段CO<sub>2</sub>的 $\delta^{13}\text{C}$ 小至 $-24.5\text{‰}$ ,应为TSR反应产物。

TSR反应程度的差异是导致该区天然气干燥系数和重烃碳同位素值变化极大的主控因素(图1),而成熟度的影响相对次要。随TSR反应增强,天然气干燥系数增大,C<sub>2+</sub>烷烃的碳和氢同位素变重,乙烷 $\delta^{13}\text{C}$ 多大于 $-28.0\text{‰}$ ,已超过常规区分油型气与煤成气的界限值(表2)。需要指出的是,H<sub>2</sub>S化学性质活泼,在地层水中溶解度大,易与金属离子结合形成自生矿物沉淀。因此,部分井的天然气中虽未检出H<sub>2</sub>S,地层中也未发现膏盐岩,但仍不能排除曾发生强烈TSR作用的可能。例如,位于膏岩歼灭线附近的T51井和T52井,其低产气流中未见H<sub>2</sub>S,但乙烷 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-26.0\text{‰}$ ,甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 约为 $-42.0\text{‰}$ ,该特征并非上部煤成气混入所致。受TSR影响,中、东部马四段天然气干燥系数较高,但其真实成熟度整体应不高。例如,GP1H井马四段源岩R<sub>o</sub>应不高于1.5%,与该区上古生界煤系R<sub>o</sub>介于1.2%~1.4%基本吻合,但略低于该区沥青等效R<sub>o</sub>(介于1.8%~2.0%)<sup>[43]</sup>,后者偏高可能与TSR作用导致沥青成熟度增加有关。

位于南部的延川南气藏,其马五<sup>4</sup>亚段天然气干燥系数超过99.0%,但未经过TSR作用;甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ (介

于 $-43.0\text{‰} \sim -40.3\text{‰}$ ,乙烷 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 $-35.9\text{‰} \sim -32.6\text{‰}$ <sup>[41]</sup>。其高干燥系数应归因于潜在海相烃源岩已达过成熟阶段,该区上古生界煤系R<sub>o</sub>(2.3%~3.1%)和所产煤成气干燥系数( $>99.5\%$ )为此提供了佐证<sup>[43]</sup>。该天然气为典型原油裂解气,与神木地区盐下天然气具有相似的来源与成藏过程。

## 4.2 潜在烃源岩特征

马家沟组盐下油型气的来源目前普遍被认为是马家沟组自身碳酸盐岩和盐间薄层泥质岩<sup>[4, 6, 8, 26, 42-43]</sup>;也有学者提出分散可溶有机质及有机酸岩提供了补充<sup>[30]</sup>。本文综合分析后认为,下部更古老烃源岩(寒武系和长城系)贡献对天然气的富集起着重要作用。

1) 东部奥陶系盐间烃源岩规模小。马家沟组盐下泥质岩属盐间薄夹层,有机质丰度高,TOC介于2.6%~3.3%,有机质类型好(I-II<sub>A</sub>型)<sup>[25]</sup>。然而,这些泥岩单层厚度极薄(0.1~25.0 cm),累计厚度也不大(5.0~9.0 m)。位于烃源岩发育核心及近核心区的T112井(全取心段总厚度为553.0 m)和Sh473井(全取心段总厚度为566.0 m)分别识别出厚度为5.6 m和9.1 m的泥质岩<sup>[12, 14, 25]</sup>。除泥质岩外,黑灰色白云岩虽被认为可能提供生气补充,但其TOC极低(平均值仅为0.2%)<sup>[25]</sup>,严格意义上难以称为有效烃源岩。整体来看,优质烃源岩规模小且分散分布,厚度为5.0~9.0 m的优质烃源岩分散在厚度超500.0 m的地层中,与集中分布的烃源岩相比,所生成天然气在单位体积岩石中含量低,聚集成藏的概率也会相应降低。若无其他气源补充,形成规模气藏的可能性不大。此判断与下面几方面证据相互印证。

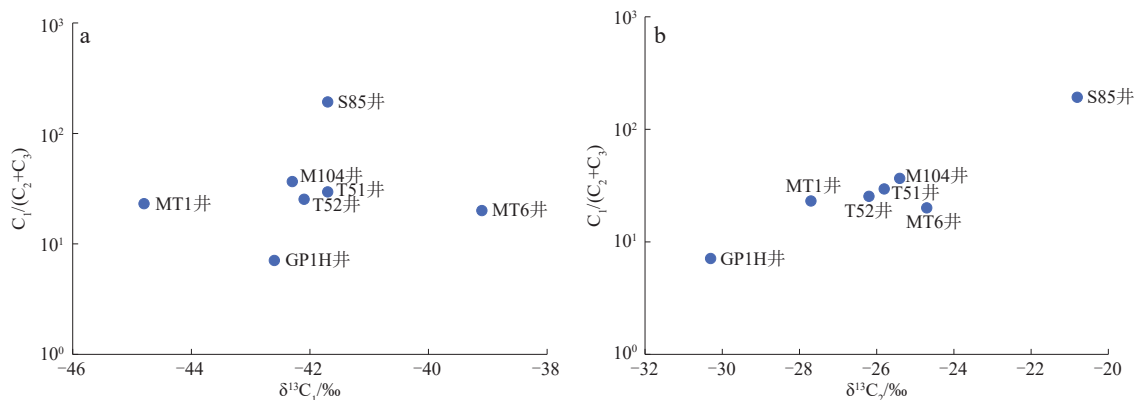


图1 鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组盐下天然气干燥系数与甲烷(a)和乙烷(b)碳同位素值关系

Fig. 1 Relationships of drying coefficient with the carbon-isotope values of methane and ethane for natural gas from subsalt strata of the Ordovician Majiagou Formation, eastern Ordos Basin

$C_1/(C_2+C_3)$ . 甲烷/(乙烷+丙烷)含量比值,即天然气干燥系数; $\delta^{13}\text{C}_1$ . 甲烷碳同位素值; $\delta^{13}\text{C}_2$ . 乙烷碳同位素值

2) 较轻的甲烷碳同位素与较重的马家沟组盐下烃源岩干酪根碳同位素不匹配,暗示存在其他来源。东部盐下高产井甲烷碳同位素普遍较轻( $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-44.0\text{‰} \sim -40.0\text{‰}$ ),而中、西部普遍偏重( $-39.0\text{‰} \sim -35.0\text{‰}$ )。前人将之归因于中、西部有程度不等煤成气混入<sup>[5]</sup>。然而,湿气组分分子内同位素表明应为典型油型气,煤成气的影响可忽略不计(图2)。更为关键的是,在成熟度相近的情况下,东部盐下天然气碳同位素比乌拉力克组页岩气更轻。例如,盆地西北部E103井乌拉力克组页岩气中甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-39.0\text{‰}$ ,页岩 $R_o$ 为1.6%;中段甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 增加至 $-38.0\text{‰} \sim -36.0\text{‰}$ ,页岩 $R_o$ 介于 $1.9\% \sim 2.1\%$ <sup>[44]</sup>。而东部高产井甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 均小于 $-40.0\text{‰}$ ,神木—米脂一带至延川南 $R_o$ 从 $1.3\% \sim 1.8\%$ 增加至 $2.3\% \sim 3.0\%$ <sup>[41]</sup>。而东部盐下烃源岩干酪根碳同位素却正好相反,整体较重, $\delta^{13}\text{C}$ 平均为 $-27.0\text{‰} \sim -26.3\text{‰}$ <sup>[8, 13, 45]</sup>(表1)。相比之下,乌拉力克组页岩干酪根碳同位素偏轻, $\delta^{13}\text{C}$ 介于 $-32.0\text{‰} \sim -28.0\text{‰}$ ,平均值为 $-28.5\text{‰}$ 。基于此判断盐下马家沟组盐湖相烃源岩产生的甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 应偏重。此类天然气在Shu168井、M172井、T106井和M90井马四段均有发现,其甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 分别为 $-38.6\text{‰}$ , $-37.9\text{‰}$ , $-37.2\text{‰}$ 和 $-38.9\text{‰}$ 。类似地,LT1井甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-39.0\text{‰}$ ,T97井和T99井甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 高达 $-37.0\text{‰}$ 。这些井均为气显示井或低产井,应是马家沟组盐下自生自储为主的天然气。地理位置上,这些井远离深大断裂<sup>[11, 43]</sup>,周边仅发育奥陶系层内断裂,缺乏联通下部地层(长城系和寒武系)的通道(图3)。据此推断,东部深层存在其他烃源,可产生碳同位素较轻的甲烷,并沿断层向上运移至马家沟组聚集成藏。东部寒武系局部发现的高丰度古沥青, $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 $-30.5\text{‰}$ (中阳地区) $\sim -29.5\text{‰}$ (清水河地区)之间<sup>[40]</sup>,推测可能存在的烃源岩干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 集中在 $-32.5\text{‰} \sim -31.5\text{‰}$ ,侧面证明了深部存在烃源。

3) 探井产气情况跟深大断裂分布相关。东部盐下探井产气能力差异显著,高产气井(如MT1井和GP1H井)几乎均紧邻深大断裂分布,而偏离深大断裂的井多为气显示井,偶有低产井(图3)。断裂既能改善致密储层的储集性能<sup>[11, 43, 46]</sup>,也是深部来源天然气的重要运移通道。

4) 储层包裹体成岩流体显示具深层流体的充注特征。张洁等<sup>[47]</sup>发现乌审旗地区马四段储层内存在4期成岩流体充注,根据各期流体锶同位素及稀土元素组成模式判断,第一期流体源自奥陶系内部,而后两期主成藏期流体则来自奥陶系以下的更深部老地

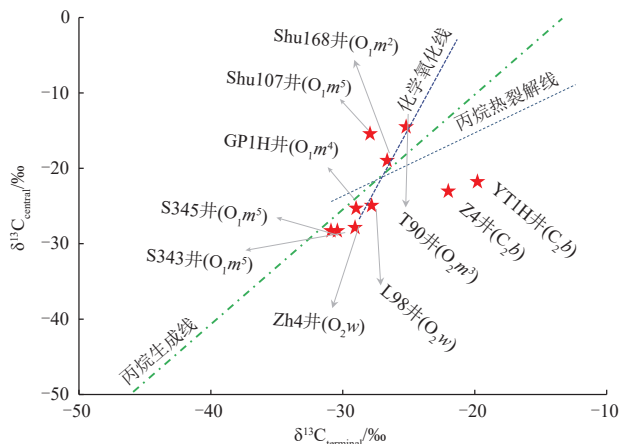


图2 鄂尔多斯盆地丙烷分子内碳同位素组成特征  
(底图据参考文献[18])

Fig. 2 Intramolecular carbon isotopic composition of propane in natural gas from the Ordos Basin (base map after reference [18])  
 $\delta^{13}\text{C}_{\text{terminal}}$  丙烷边位碳同位素值; $\delta^{13}\text{C}_{\text{central}}$  丙烷中间位置碳同位素值;  
 $\text{C}_2\text{b}$ . 本溪组; $\text{O}_1\text{m}^4$ . 马家沟组四段; $\text{O}_1\text{m}^5$ . 马家沟组五段; $\text{O}_1\text{w}$ . 乌拉力克组

层。这些研究认为该区天然气多来源特征提供了直接证据。

#### 4.3 多层系立体成藏模式

综上所述,马家沟组盐下天然气具有双源或多源供烃特征,既有奥陶系马家沟组盐间泥页岩的贡献,也有深部古老烃源岩的重要补充。

根据甲烷碳同位素极轻的特征,判断该天然气为长期累积的原油裂解气。然而,马家沟组盐下沥青丰度普遍较低(含量 $< 0.2\%$ )<sup>[48]</sup>,与四川盆地川中震旦系-寒武系发育高丰度固体沥青(含量介于 $1.0\% \sim 7.0\%$ )形成鲜明对比<sup>[49]</sup>。这表明马家沟组盐下原油充满度不高,在主生油窗期间并非下部更古老烃源所生原油的主要聚集层位,其内少量沥青主要源自马家沟组自生自储原油,而更古老烃源岩形成的古油藏应主要分布于奥陶系之下地层。东部中阳和清水河地区寒武系发现的较高丰度沥青(沥青含量介于 $0.4\% \sim 5.7\%$ ,平均值为 $2.2\%$ )为此提供了佐证<sup>[40]</sup>。

与四川盆地川中地区类似<sup>[50]</sup>,该区油气分布也应具多层系立体成藏模式:下部烃源岩(长城系和寒武系)生成的古油藏主要分布在奥陶系之下,后期裂解成气。天然气随着深大断裂输导至马家沟组盐下,与马家沟组自生自储天然气混合成藏。马家沟组多套厚层岩盐盖层对下部古油气起到了良好的封盖保存作用(图4)。因此,推断奥陶系之下应发育古油藏与天然气藏,具勘探潜力。

该区马家沟组盐下天然气高效聚集与四川盆地川

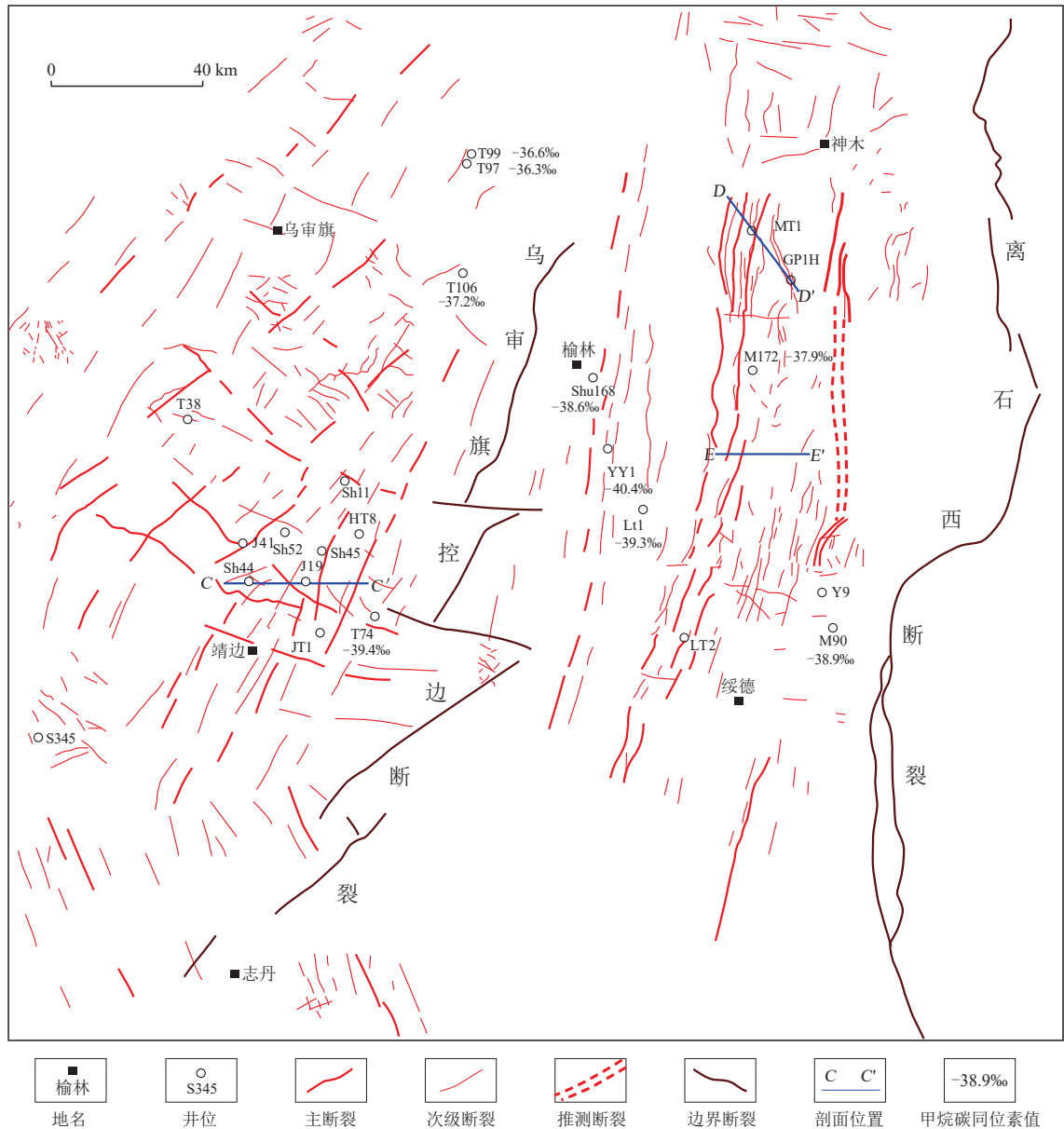


图3 鄂尔多斯盆地奥陶系底界断裂与盐下甲烷碳同位素值耦合图(断裂底图据文献[43])

Fig. 3 Map showing faults at the Ordovician base, coupled with the carbon-isotope values of methane within subsalt strata, in the Ordos Basin (fault base map after reference [43])

中二叠系-三叠系天然气类似,除了深大断裂作为运移通道这一必要条件外,还需考虑深部烃源岩的发育情况。目前认为,寒武系烃源岩在古隆起以东可能有分布,但对其发育程度认识仍不足;长城系在东部是否发育,目前仍存争议<sup>[7, 21, 22, 34]</sup>。

## 5 南部寒武系-奥陶系天然气成藏特征

南部海相地层中获得勘探突破的地区和层位包括:庆阳古隆起及周边中寒武统(张夏组和三山子组)与奥陶系马家沟组,迄今已发现十余口工业气井;宜川-黄

龙地区马家沟组;富县探区FG4井和7井马家沟组获日产 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 天然气,另有低产气流井数口。储集体以古风化壳为主,也发现有内幕白云岩和灰岩储层。跟盆地东部马家沟组盐下类似,该区钻遇风化壳的探井广泛含气但仅少量获高产,以局部富集成藏为特点。

### 5.1 天然气特征

天然气特征跟东部马家沟组盐下有明显区别,与四川盆地龙马溪组页岩气有诸多相似之处(表3)。天然气干燥系数高, $C_1/C_{1-5}$ 均超过了99.0%。烷烃气碳同位素部分或全部倒转( $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$ 或 $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 >$

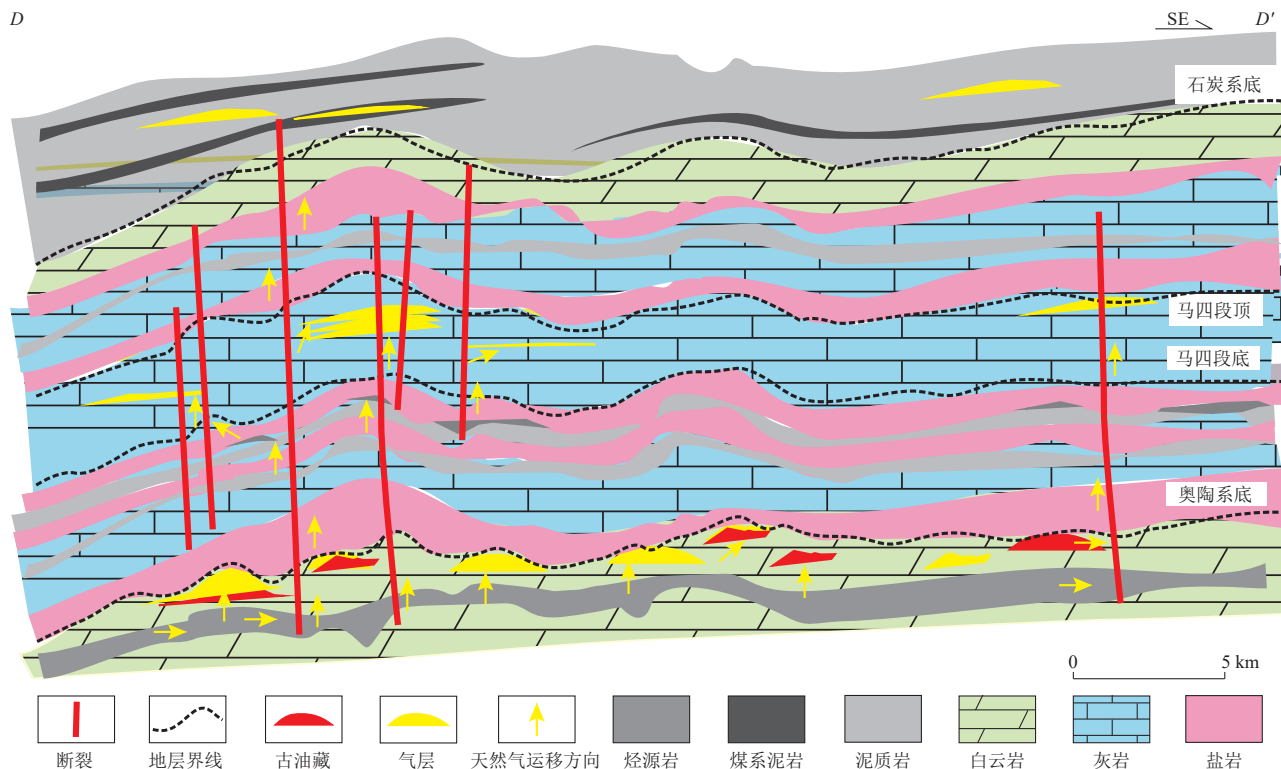


图4 鄂尔多斯盆地中央古隆起以东多层系立体成藏模式示意图(剖面位置见图3)

Fig. 4 Section showing the multi-sequence stereoscopic hydrocarbon accumulation pattern to the east of the central paleo-uplift, Ordos Basin (see Fig. 3 for the section location)

$\delta^{13}\text{C}_3$ )。甲烷碳同位素较重,  $\delta^{13}\text{C}$  介于  $-33.0\text{‰}$  ~  $-30.0\text{‰}$ , 个别样品小至  $-34.0\text{‰}$ 。乙烷含量较低, 介于  $0.1\% \sim 0.6\%$ , 其  $\delta^{13}\text{C}$  一般介于  $-40.0\text{‰} \sim -36.0\text{‰}$ , L30 井的小至  $-41.0\text{‰}$ 。含微量丙烷, 其  $\delta^{13}\text{C}$  多介于  $-34.0\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$ , 但 L30 井和 L18 井的分别为  $-39.6\text{‰}$  和  $-37.3\text{‰}$ 。

## 5.2 天然气来源

前人对庆阳地区寒武系-奥陶系天然气的来源看法不一: ① 有的认为天然气为上生下储成藏模式, 主体来自上古生界煤系、少量寒武系海相天然气补充<sup>[14, 50]</sup>。依据是甲烷  $\delta^{13}\text{C}$  跟上古生界煤成气类似(表3)。② 有的则认为天然气主要来自寒武系烃源岩<sup>[15, 56]</sup>, 依据主要是较小的乙烷  $\delta^{13}\text{C}$  ( $< -28\text{‰}$ ) 以及甲烷  $\delta^{13}\text{C}$  跟寒武系干酪根的  $\delta^{13}\text{C}$  类似; 王杰等<sup>[52]</sup>认为富县地区马家沟组天然气为自生自储, 主要来源于马家沟组盐湖相烃源岩。

乙烷簇同位素值展示典型油型气来源特征(图5)<sup>[19]</sup>。该图是基于国内外大量不同类型天然气的特征, 结合模拟实验结果提出的用于判识天然气母源的模板<sup>[19]</sup>。基于此判断天然气中甲烷未有明显的煤成气混入: 因成熟度差异, 湿气( $\text{C}_{2+}$ )组分在上部煤成气中的丰度

( $1\% \sim 6\%$ ) 比下部海相天然气中高 ( $< 0.5\%$ ), 若有煤成气混入, 湿气组分受混入影响会更大。这其实跟煤在庆阳地区整体发育规模不大相吻合, 仅分布有  $0 \sim 5 \text{ m}$  厚的山西组煤, 缺失太原组煤。

基于庆阳等地区寒武系-奥陶系海相天然气的特征, 对比盆地内典型过成熟煤成气特征(Sh137 井和 L84 井等)(表3; 图5), 认为海相源岩来源的过成熟天然气应具备以下特征:  $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2$ ,  $\delta^{13}\text{C}_1 < -30.0\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_2 < -36.0\text{‰}$ ; 而过成熟煤来源的天然气则具备以下特征:  $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2$ , 但  $\delta^{13}\text{C}_1 > -30.0\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_2 > -35.0\text{‰}$ 。据此推测宜川-富县马家沟组风化壳天然气以海相油型气为主(表3), 极个别为混合或上生下储煤成气。当然, 以这个标准限定的油型气应该还是比较纯的, 那些混合来源或遭受过散失的油型气皆被排除在外, 未来可借助分子内同位素特征进一步精细厘定混合比例。

盆地南缘发育多套海相烃源岩: 长城系(白草坪组与崔庄组)、寒武系(东坡组)及奥陶系(平凉组和乌拉力克组)分布在庆阳以西; 马家沟组在富县-黄陵一带)。奥陶系平凉组在庆阳古陆及以东缺失, 古陆以西出露,  $R_o$  介于  $0.6\% \sim 1.5\%$ , 处于油-凝析油窗<sup>[31]</sup>。显然, 该页岩成熟度低, 贡献不大, 可忽略不计。寒武系东坡组烃源岩在盆地南部发育, 优质烃源岩主要出露

表3 鄂尔多斯盆地南部海相天然气地球化学特征<sup>[14, 51-56]</sup>Table 3 Geochemical characteristics of marine natural gas in the southern Ordos Basin<sup>[14, 51-56]</sup>

| 地区      | 井号    | 层位                                              | 天然气组成/%         |                               |                               |                                |                |                 | 天然气组分碳同位素/‰     |                               |                               |                 | $\delta D_{CH_4}/\text{‰}$ |
|---------|-------|-------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------------------|
|         |       |                                                 | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | N <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> | CO <sub>2</sub> |                            |
| 庆阳地区    | QT16  | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>                   | 83.39           | 0.42                          | 0.10                          | —                              | 3.75           | 12.13           | -32.80          | -36.40                        | -31.60                        | —               | -159                       |
|         | L30   | O <sub>1</sub> m <sup>2</sup>                   | 82.50           | 0.41                          | 0.10                          | 0.02                           | 0.50           | 6.15            | -31.30          | -41.00                        | -39.60                        | —               | -164                       |
|         | L31   | Є <sub>2</sub> z                                | 22.63           | 0.11                          | 0.03                          | —                              | 66.33          | 7.14            | -33.80          | -36.12                        | -29.80                        | —               | -167                       |
|         | L52   | Є <sub>2</sub> s                                | 91.77           | 0.51                          | 0.13                          | 0.03                           | 0.35           | 7.12            | -32.80          | -36.50                        | -33.40                        | —               | -156                       |
|         | HT1   | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>                   | 77.48           | 0.68                          | 0.13                          | 0.01                           | 10.27          | 11.43           | -31.60          | -35.80                        | -33.34                        | —               | —                          |
|         | L18   | O <sub>1</sub> m <sup>2</sup>                   | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | n. d.          | n. d.           | -32.30          | -37.50                        | -37.30                        | —               | —                          |
|         | L5    | P <sub>1</sub> s                                | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | n. d.          | n. d.           | -27.40          | -33.40                        | -31.80                        | —               | —                          |
|         | L7    | P <sub>1</sub> s+P <sub>2</sub> sh <sup>8</sup> | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | n. d.          | n. d.           | -25.90          | -33.60                        | -32.90                        | —               | —                          |
|         | L17   | Є <sub>2</sub> z                                | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | n. d.          | n. d.           | -31.44          | -37.34                        | —                             | —               | —                          |
|         | L18   | O <sub>1</sub> m <sup>2</sup>                   | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | n. d.          | n. d.           | -32.76          | -37.61                        | -37.29                        | —               | —                          |
| 富县-黄龙地区 | XF3-1 | O <sub>1</sub> m <sup>5(6)</sup>                | 83.54           | 2.95                          | 0.55                          | 0.07                           | 1.27           | 11.35           | -30.70          | -36.40                        | -32.90                        | —               | -157                       |
|         | XF3-2 | O <sub>1</sub> m <sup>5(6)</sup>                | 85.62           | 0.52                          | 0.12                          | —                              | 5.52           | 7.92            | -30.20          | -36.10                        | -31.70                        | -11.7           | -155                       |
|         | FG4   | O <sub>1</sub> m <sup>5(5)</sup>                | 88.94           | 0.23                          | 0.01                          | —                              | 0.76           | 9.30            | -32.60          | -37.00                        | -30.40                        | -6.7            | -159                       |
|         | XF11  | O <sub>1</sub> m <sup>5(1)</sup>                | 77.72           | 1.66                          | 0.50                          | 0.17                           | 0.83           | 16.98           | -31.60          | -39.60                        | -31.90                        | -4.3            | -161                       |
|         | FT1   | O <sub>1</sub> m <sup>5(7)</sup>                | 89.95           | 1.03                          | 0.26                          | 0.01                           | 2.05           | 6.37            | -33.90          | -36.10                        | -25.90                        | —               | -168                       |
|         | Yi6   | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-2)</sup>              | 83.26           | 0.75                          | 0.08                          | 0.01                           | 0.72           | 1.13            | -32.60          | -36.40                        | -32.70                        | —               | -163                       |
|         | Y29   | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>                   | 90.05           | 2.03                          | 1.26                          | 0.01                           | 1.81           | 4.61            | -33.90          | -35.10                        | -29.00                        | -3.8            | -170                       |
|         | Y5    | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>                   | 92.30           | 2.46                          | 1.14                          | 0.03                           | 0.70           | 3.37            | -32.50          | -35.80                        | -28.20                        | 1.7             | -172                       |
|         | YCan1 | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>                   | 94.60           | 1.83                          | 1.02                          | 0.01                           | 0.40           | 2.10            | -31.00          | -36.50                        | -30.00                        | 2.1             | -161                       |
|         | Y30   | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>                   | 94.23           | 1.72                          | 0.83                          | 0.01                           | 0.28           | 2.82            | -31.80          | -35.70                        | -29.30                        | -2.4            | -167                       |
|         | Y11   | C <sub>2</sub> b                                | 91.50           | 2.28                          | 2.19                          | 0.72                           | 0.66           | 0.88            | -38.00          | -30.10                        | -28.00                        | -0.9            | -170                       |
|         | Y14   | C <sub>2</sub> b                                | 91.00           | 3.57                          | 2.10                          | 0.41                           | 0.94           | 1.93            | -37.00          | -32.70                        | -29.70                        | 1.1             | -163                       |
|         | Y6    | P <sub>1</sub> x                                | 93.36           | 0.59                          | 0.04                          | —                              | 5.80           | 0.14            | -32.30          | -36.80                        | -32.00                        | -2.4            | -175                       |
|         | YTan1 | P <sub>1</sub> x                                | 95.54           | 0.54                          | 0.09                          | 0.02                           | 2.79           | 0.64            | -30.20          | -35.10                        | -32.90                        | —               | -173                       |
|         | Y6    | P <sub>1</sub> s                                | 93.41           | 0.65                          | 0.17                          | 0.03                           | 4.41           | 1.02            | -32.40          | -36.40                        | -32.30                        | -1.4            | -174                       |
|         | Y2    | P <sub>1</sub> s                                | 96.10           | 0.43                          | 0.22                          | 0.03                           | 0.10           | 3.13            | -31.30          | -35.80                        | -32.00                        | -4.1            | -168                       |
|         | Y12   | P <sub>1</sub> s                                | 94.80           | 0.88                          | 0.14                          | 0.14                           | 1.13           | 2.38            | -31.00          | -36.10                        | -34.30                        | -3.4            | -168                       |
|         | XF9   | P <sub>1</sub> s                                | 89.23           | 1.46                          | 0.25                          | —                              | 2.49           | 6.53            | -26.70          | -32.10                        | -31.60                        | -13.7           | -146                       |

注:  $\delta D_{CH_4}$ , 甲烷氢同位素; CH<sub>4</sub>, 甲烷; C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, 乙烷; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, 丙烷; C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, 丁烷; N<sub>2</sub>, 氮气; CO<sub>2</sub>, 二氧化碳; C<sub>2</sub>b, 本溪组; P<sub>1</sub>x, 下石盒子组; Є<sub>2</sub>z, 寒武系张夏组; Є<sub>2</sub>s, 三山子组; P<sub>1</sub>s, 上石盒子组; O<sub>1</sub>m<sup>4</sup>, 马家沟组四段; O<sub>1</sub>m<sup>5(5-7)</sup>, 马家沟组五<sup>5-7</sup>亚段; O<sub>1</sub>m<sup>5(10)</sup>, 马家沟组五<sup>10</sup>亚段; 其他地层代号类似; “n. d.”表示未检测数据; “—”表示样品中不含该组分。

在盆地以南的秦岭地区,距离庆阳古隆起约200 km;越往盆地内部,烃源岩质量越差<sup>[15]</sup>。长城系崔庄组下段发育烃源岩, JT1井 TOC 平均值为0.67%<sup>[7]</sup>; PT1井 TOC 平均值为0.80%,最大值为1.50%<sup>[21]</sup>。因此,南部天然气可能以长城系贡献为主,混有寒武系气;而在黄陵—富县地区,同时有马家沟组烃源岩的贡献(图6)。

## 6 靖边气田海相天然气

靖边气田已获近万亿立方米地质储量,对主要产层奥陶系马家沟组古风化壳(马五<sup>1-4</sup>亚段)天然气的来源已获共识:以上古生界煤成气为主,混有马家沟组海

相油型气<sup>[57-58]</sup>。该区马家沟组盐下(马五<sup>6-10</sup>亚段),也被认为是这两种气的混合<sup>[5, 9]</sup>。

随着拓边新井资料的进一步补充<sup>[59-60]</sup>,发现有些井以成熟或过成熟油型气为主、不含或少含煤成气<sup>[53-54]</sup>。受资料所限,尚无法计算这类天然气在靖边气田的总体占比,但这一发现无疑为深层海相油型气的勘探提供了信心,为开辟全新领域带来了希望。海相油型气即有来自过成熟烃源岩晚期阶段的天然气,其烷烃气组分的 $\delta^{13}C$ 倒转或部分倒转,出现在靖边气田南部;也有原油裂解气,其烷烃气组分正序分布,主要分布在靖边气田中部和北部;中、北部个别井也发现这两种混合的气(表4)。下面分述之。

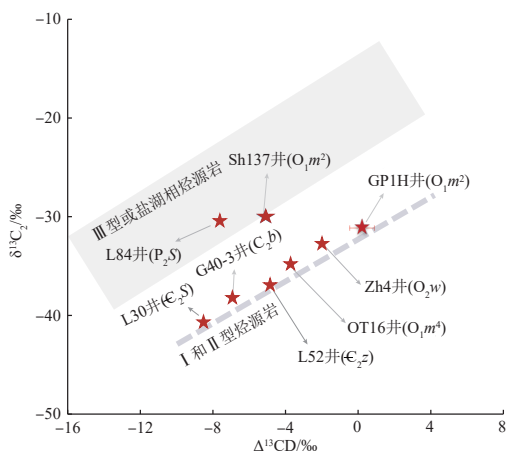


图5 鄂尔多斯盆地南部海相地层天然气中乙烷同位素特征<sup>[19]</sup>

Fig. 5 Ethane isotopic characteristics of natural gas within marine strata in the southern Ordos Basin<sup>[19]</sup>

$\Delta^{13}\text{CD}$ . 乙烷簇同位素值;  $\delta^{13}\text{C}_2$ . 乙烷碳同位素值;  $\text{P}_2\text{S}$ . 上石盒子组;  $\text{C}_{2z}$ . 寒武系张夏组;  $\text{C}_{2s}$ . 三山子组;  $\text{O}_1\text{m}^4$ . 马家沟组四段;  $\text{O}_1\text{m}^2$ . 马家沟组二段;  $\text{O}_1\text{w}$ . 乌拉力克组  
(灰色虚线表示 I 型和 II 型干酪根来源天然气; 灰色色块表示 III 型干酪根或盐湖相来源天然气。)

## 6.1 过成熟油型气

属典型过成熟海相烃源岩来源的气,与盆地南缘

寒武-奥陶系天然气特征类似,干燥系数极高(>99.0%),甲烷碳同位素相对较重但比煤成气甲烷碳同位素轻, $\delta^{13}\text{C}$ 多数介于-35.0‰~-31.0‰,甲烷和乙烷碳、氢同位素值均发生倒转,倒转幅度大、多大于5.0‰。

该类天然气在靖边气田中南部广泛存在,自靖边以南至延长探区多数井古风化壳气均展示这种特征,与盆地南缘海相天然气分布区相邻。类似天然气在延安地区石炭系本溪组也有发现(表4),如G40-3井、Sh467井、Shi12井和Shi37井,其中G40-3井乙烷簇同位素证实为典型油型气(图5)<sup>[19]</sup>。靖西南部多口井也展示类似特征,如L45井、L54井、Sh106井、Sh377井和Sh323井等(表4)。

对靖边气田油型气的可能来源,早期研究者普遍认为是奥陶系马家沟组与石炭系本溪组泥岩。随着认识深入,证实本溪组泥页岩并非海相沉积,而是一套海-陆过渡相地层,有机质以陆源为主,为典型III型干酪根,其碳同位素较重,跟本溪组8#煤类似( $\delta^{13}\text{C}$ 平均值约为-24.0‰)。该套泥岩产生的天然气分子内同位素具煤成气特征,不会呈现油型气特征。图2榆林地区太原组海相灰岩中天然气呈现典型III型有机质来

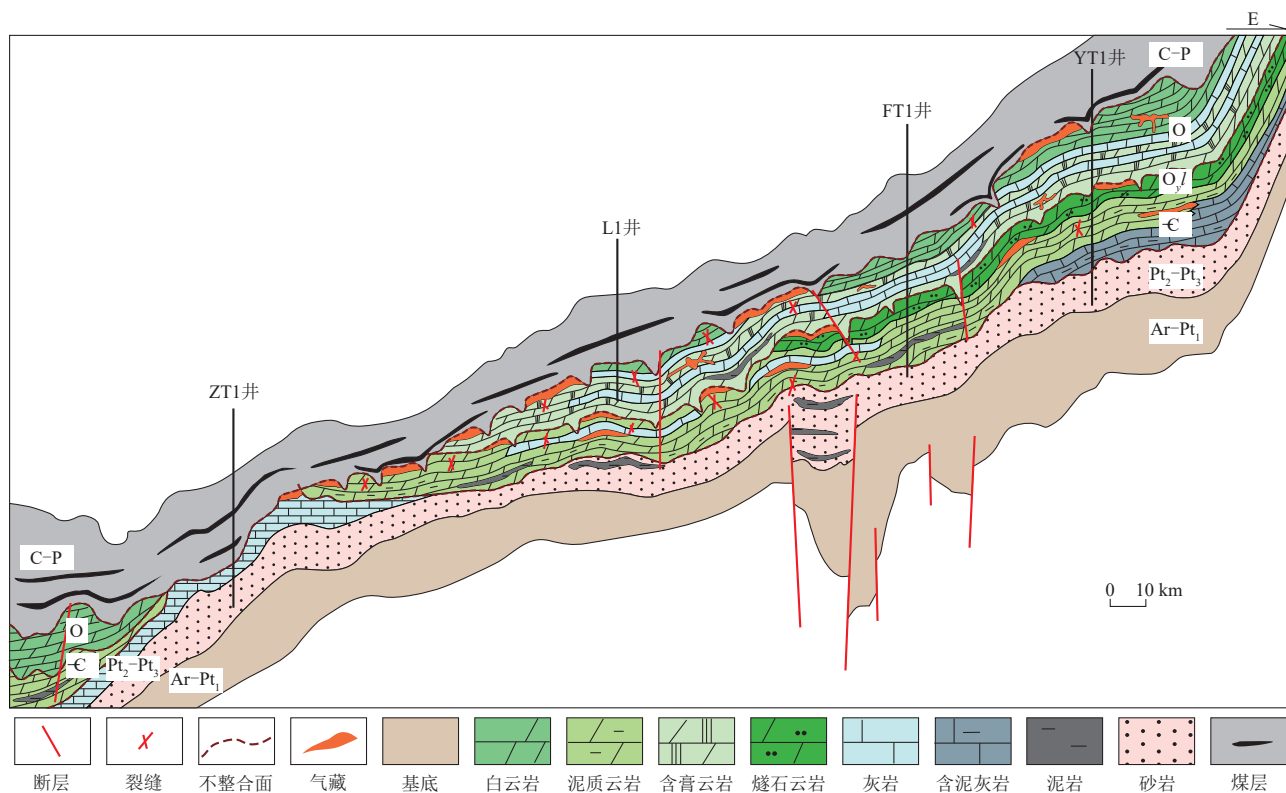


图6 鄂尔多斯盆地南部海相油型气成藏模式示意图

Fig. 6 Schematic diagram showing the marine oil-associated gas accumulation pattern in the southern Ordos Basin

C-P. 石炭系-二叠系; O. 奥陶系; C. 寒武系;  $\text{Pt}_2\text{-Pt}_3$ . 中-新元古界; Ar-Pt₁. 太古宇-古元古界

源特征,无任何油型气混入迹象。而奥陶系马家沟组烃源岩主要分布在乌审旗古隆起两侧,对靖边中、北部及西部可能有贡献,在靖边以南至延安地区发育程度差<sup>[3, 12, 14, 25, 68]</sup>。奥陶系另一套烃源岩乌拉力克组-克里磨里组泥页岩在盆地西缘天环凹陷内发育<sup>[31]</sup>,而在靖边气田区缺失。此外,寒武系烃源岩主要发育在盆

缘,而在盆内其质量较差<sup>[28]</sup>。这些表明寒武系和奥陶系均不是该区过成熟天然气的可能来源。

烃源岩最有可能发育于长城系,且该区的烃源岩已处于过成熟阶段( $R_o \geq 2.5\%$ )<sup>[69]</sup>。尽管目前该区域烃源岩的具体情况尚不落实<sup>[16, 21]</sup>,但基于此类天然气的分布状况,可以推断该区应有分布。

表 4 鄂尔多斯盆地靖边气田海相油型天然气地球化学特征<sup>[5, 9, 26, 55, 61-66]</sup>

Table 4 Geochemical characteristics of marine oil-associated gas in the Jingbian gas field, Ordos Basin<sup>[5, 9, 26, 55, 61-66]</sup>

| 类型            | 井号     | 层位                                 | 天然气组成及含量/%     |                 |                 |                               |                               |                                | 天然气组分碳同位素值/‰    |                               |                               | 甲烷氢同位素值/‰       |
|---------------|--------|------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|
|               |        |                                    | N <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> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | CH <sub>4</sub> |
| 海相页岩晚期<br>来源气 | L54    | O <sub>1</sub> m <sup>5(7)</sup>   | 22.11          | 2.06            | 75.61           | 0.14                          | 0.01                          | —                              | -33.4           | -36.8                         | —                             | -156            |
|               | L45    | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>   | 2.78           | 4.93            | 91.85           | 0.36                          | 0.03                          | —                              | -31.9           | -36.8                         | —                             | -164            |
|               | SH377  | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-2)</sup> | 1.05           | 2.80            | 95.58           | 0.27                          | 0.03                          | —                              | -32.9           | -36.5                         | -29.6                         | —               |
|               | SH323  | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>      | 2.43           | 5.93            | 91.14           | 0.40                          | 0.06                          | 0.01                           | -33.4           | -35.9                         | -30.1                         | —               |
|               | SH106  | O <sub>1</sub> m <sup>5(1)</sup>   | —              | —               | 98.29           | 0.22                          | 0.03                          | —                              | -30.7           | -37.5                         | -30.0                         | -166            |
|               | SH265  | O <sub>1</sub> m <sup>5(1)</sup>   | 0.21           | 3.26            | 96.09           | 0.38                          | 0.06                          | —                              | -31.0           | -37.3                         | -32.8                         | —               |
|               | S434   | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>      | 2.77           | 4.07            | 92.74           | 0.35                          | 0.04                          | —                              | -31.6           | -35.8                         | -30.6                         | —               |
|               | S438   | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>      | 0.63           | 3.99            | 94.92           | 0.41                          | 0.03                          | —                              | -31.7           | -37.8                         | -33.3                         | —               |
|               | S102   | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>      | 1.37           | 5.63            | 92.75           | 0.22                          | 0.01                          | 0.02                           | -33.4           | -35.7                         | -28.9                         | —               |
|               | S339   | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>      | 2.12           | 3.43            | 93.82           | 0.56                          | 0.03                          | 0.04                           | -31.4           | -37.3                         | -29.4                         | —               |
|               | S431   | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>      | 2.72           | 5.78            | 91.17           | 0.31                          | 0.02                          | —                              | -34.0           | -37.0                         | -33.4                         | —               |
|               | S273   | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>      | 3.95           | 3.85            | 91.82           | 0.37                          | 0.01                          | —                              | -31.2           | -36.8                         | -29.9                         | —               |
|               | S281   | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>      | 0.25           | 2.95            | 96.34           | 0.39                          | 0.07                          | —                              | -31.3           | -35.5                         | -32.9                         | —               |
|               | S313   | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>      | 2.84           | 2.14            | 94.65           | 0.33                          | 0.04                          | —                              | -30.2           | -39.7                         | —                             | —               |
|               | S337   | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>      | 3.23           | 2.93            | 93.18           | 0.46                          | 0.20                          | —                              | -30.1           | -37.7                         | —                             | —               |
|               | G48-15 | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-2)</sup> | 0.73           | 6.15            | 92.48           | 0.26                          | 0.02                          | —                              | -30.0           | -36.7                         | -28.7                         | -164            |
|               | G46-16 | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-2)</sup> | 1.39           | 5.52            | 92.22           | 0.24                          | 0.03                          | —                              | -30.2           | -36.0                         | -26.4                         | -164            |
|               | T76    | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-2)</sup> | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -31.9           | -37.1                         | -32.1                         | —               |
|               | SH441  | O <sub>1</sub> m <sup>5(1)</sup>   | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -31.2           | -36.8                         | -29.7                         | —               |
|               | T80    | O <sub>1</sub> m <sup>5(1)</sup>   | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -31.7           | -36.6                         | -30.7                         | —               |
|               | S379   | O <sub>1</sub> m <sup>5(6)</sup>   | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -36.5           | -39.4                         | —                             | —               |
|               | Shi12  | C <sub>1</sub> b                   | 0.59           | 3.51            | 95.31           | 0.53                          | 0.04                          | —                              | -30.6           | -37.2                         | -35.8                         | -165            |
|               | Shi37  | C <sub>1</sub> b                   | 0.22           | 2.73            | 96.60           | 0.42                          | 0.03                          | —                              | -30.8           | -37.1                         | -37.3                         | -170            |
|               | SH467  | C <sub>1</sub> b                   | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -31.2           | -37.4                         | -30.7                         | —               |
|               | G40-3  | C <sub>1</sub> b                   | 0.75           | 5.43            | 92.94           | 0.64                          | 0.08                          | —                              | -31.8           | -36.0                         | -32.6                         | -164            |
|               | Sh127  | C <sub>1</sub> b                   | 0.59           | 3.51            | 95.31           | 0.53                          | 0.04                          | —                              | -30.6           | -37.2                         | -35.8                         | -165            |
|               | Sh48   | C <sub>1</sub> b                   | 0.25           | 4.29            | 94.89           | 0.52                          | 0.04                          | —                              | -29.9           | -36.5                         | —                             | -163            |
| 原油裂解气         | Shu15  | O <sub>1</sub> m <sup>5(1)</sup>   | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -37.7           | -33.4                         | -29.0                         | —               |
|               | SH118  | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-2)</sup> | 0.33           | 2.74            | 94.99           | 1.56                          | 0.18                          | 0.06                           | -35.5           | -32.4                         | -30.0                         | -175            |
|               | SH2    | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-2)</sup> | 3.31           | 0.31            | 92.11           | 3.45                          | 0.42                          | 0.28                           | -41.4           | -30.1                         | -25.6                         | -184            |
|               | SH79   | O <sub>1</sub> m <sup>5(5)</sup>   | 2.79           | 0.45            | 96.55           | 0.08                          | —                             | —                              | -37.3           | -31.8                         | —                             | -166            |
|               | SH20   | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-3)</sup> | 1.02           | 0.55            | 93.10           | 0.30                          | 0.05                          | 0.03                           | -34.6           | -31.0                         | -27.5                         | -169            |
|               | S310   | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>      | 1.50           | 3.58            | 94.71           | 0.19                          | 0.01                          | —                              | -35.2           | -34.3                         | -27.9                         | —               |
|               | S381   | O <sub>1</sub> m <sup>5(5-6)</sup> | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -36.0           | -34.5                         | —                             | —               |
|               | S345   | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-2)</sup> | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -33.7           | -31.9                         | -29.8                         | —               |
|               | S343   | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-2)</sup> | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -34.0           | -31.9                         | -29.5                         | —               |
|               | SH45   | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-4)</sup> | —              | —               | 94.92           | 0.16                          | 0.04                          | —                              | -33.5           | -30.6                         | -22.9                         | -168            |
|               | T37    | O <sub>1</sub> m <sup>5(10)</sup>  | 5.67           | 6.17            | 88.05           | 0.08                          | 0.01                          | —                              | -38.2           | -30.7                         | -20.0                         | —               |

表4 鄂尔多斯盆地靖边气田海相油型天然气地球化学特征<sup>[5, 9, 26, 55, 61-66]</sup>(续)Table 4 Geochemical characteristics of marine oil-associated gas in the Jingbian gas field, Ordos Basin<sup>[5, 9, 26, 55, 61-66]</sup>(continued)

| 类型          | 井号    | 层位                                  | 天然气组成及含量/%     |                 |                 |                               |                               |                                | 天然气组分碳同位素值/‰    |                               |                               | 甲烷氢同位素值/‰       |
|-------------|-------|-------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|
|             |       |                                     | N <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> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | CH <sub>4</sub> |
|             | T9    | O <sub>1</sub> m <sup>5(7-9)</sup>  | 0.11           | 0.09            | 90.54           | 6.50                          | 2.05                          | —                              | -37.1           | -20.3                         | -20.1                         | —               |
|             | T74   | O <sub>1</sub> m <sup>5(7)</sup>    | 8.42           | 0.83            | 89.77           | 0.774                         | 0.12                          | 0.04                           | -40.1           | -29.7                         | -21.2                         | —               |
|             | T75   | O <sub>1</sub> m <sup>5(7)</sup>    | 1.29           | 1.29            | 92.24           | 1.96                          | 0.35                          | 0.08                           | -35.9           | -23.8                         | -23.3                         | —               |
|             | T36   | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>       | 6.22           | 11.49           | 82.24           | 0.04                          | —                             | —                              | -37.3           | -33.0                         | -25.8                         | —               |
|             | T37   | O <sub>1</sub> m <sup>5(5-10)</sup> | 5.67           | 6.17            | 88.05           | 0.08                          | 0.01                          | —                              | -38.2           | -30.7                         | -20.0                         | —               |
|             | T38   | O <sub>1</sub> m <sup>5(9-10)</sup> | 0.17           | 0.14            | 89.41           | 0.19                          | 0.19                          | —                              | -36.5           | -25.6                         | —                             | —               |
|             | T39   | O <sub>1</sub> m <sup>5(8)</sup>    | 48.57          | 10.09           | 40.17           | 0.01                          | —                             | —                              | -38.1           | -31.1                         | -21.9                         | —               |
|             | T45   | O <sub>1</sub> m <sup>5(6)</sup>    | 2.60           | 1.51            | 95.05           | 0.76                          | 0.05                          | —                              | -39.1           | -35.6                         | -26.7                         | —               |
|             | T52   | O <sub>1</sub> m <sup>5(6)</sup>    | 11.04          | 5.32            | 83.46           | 0.15                          | 0.01                          | —                              | -35.0           | -30.3                         | —                             | —               |
|             | T59   | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>       | 56.59          | 2.95            | 40.24           | 0.10                          | 0.04                          | —                              | -38.5           | —                             | —                             | —               |
|             | T70   | O <sub>1</sub> m <sup>5(5-6)</sup>  | 0.15           | 0.77            | 98.54           | 0.29                          | 0.02                          | —                              | -37.5           | -36.1                         | —                             | —               |
|             | T79   | O <sub>1</sub> m <sup>5(7-8)</sup>  | 6.91           | 3.18            | 89.15           | 0.10                          | 0.01                          | —                              | -35.9           | -34.8                         | —                             | —               |
|             | T122  | O <sub>1</sub> m <sup>4</sup>       | 67.01          | 4.74            | 28.17           | 0.01                          | —                             | —                              | -37.8           | -19.1                         | —                             | -166            |
|             | T67   | O <sub>1</sub> m <sup>5(5)</sup>    | 3.04           | 6.53            | 76.63           | 0.46                          | 0.45                          | —                              | -36.1           | -31.9                         | -28.3                         | —               |
|             | S234  | O <sub>1</sub> m <sup>5(6)</sup>    | 64.82          | 3.58            | 31.53           | 0.06                          | —                             | —                              | -37.3           | -34.0                         | —                             | —               |
|             | L30   | O <sub>1</sub> m <sup>5(7)</sup>    | 0.96           | 3.40            | 93.70           | 0.20                          | 0.02                          | —                              | -36.7           | -30.2                         | -29.9                         | —               |
|             | L12   | O <sub>1</sub> m <sup>5(7)</sup>    | —              | —               | 98.40           | 0.20                          | 0.01                          | —                              | -37.2           | -28.7                         | —                             | —               |
|             | L19   | O <sub>1</sub> m <sup>5(7)</sup>    | 0.87           | 0.94            | 95.10           | 0.10                          | 0.01                          | —                              | -36.9           | -30.5                         | -30.8                         | —               |
| 混合来源气       | SH93  | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-3)</sup>  | —              | —               | 94.46           | 0.67                          | 0.05                          | —                              | -31.7           | -33.6                         | -27.6                         | -168            |
|             | SH52  | O <sub>1</sub> m <sup>5(1)</sup>    | 6.18           | 0.12            | 93.08           | 0.50                          | 0.07                          | 0.01                           | -32.9           | -33.8                         | -28.9                         | -171            |
|             | SH44  | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>    | —              | —               | 95.83           | 0.33                          | 0.05                          | 0                              | -33.1           | -35.3                         | -28.1                         | -169            |
|             | SH11  | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-2)</sup>  | —              | —               | 95.07           | 1.17                          | 0.18                          | 0.01                           | -32.3           | -36.7                         | -33.9                         | -169            |
|             | SH6   | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-4)</sup>  | —              | 1.57            | 92.60           | 0.32                          | 0.03                          | 0                              | -33.9           | -34.1                         | -24.4                         | —               |
|             | L54   | O <sub>1</sub> m <sup>5(6)</sup>    | 22.11          | 2.06            | 75.61           | 0.14                          | 0.01                          | —                              | -33.4           | -36.8                         | —                             | —               |
|             | L72   | O <sub>1</sub> m <sup>5(6)</sup>    | 6.14           | 6.46            | 87.20           | 0.18                          | 0.02                          | —                              | -33.4           | -36.3                         | —                             | —               |
|             | L100  | O <sub>1</sub> m <sup>5(6)</sup>    | 12.89          | 4.50            | 82.51           | 0.09                          | 0.01                          | —                              | -36.3           | -37.5                         | —                             | —               |
|             | S260  | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>       | 2.43           | 5.93            | 91.13           | 0.42                          | 0.07                          | 0.02                           | -33.4           | -35.8                         | -29.9                         | —               |
|             | S319  | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>       | 4.59           | 4.72            | 89.98           | 0.41                          | 0.06                          | 0.08                           | -33.3           | -33.1                         | -29.2                         | —               |
|             | S322  | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>       | 1.60           | 4.89            | 93.21           | 0.27                          | 0.03                          | —                              | -32.1           | -33.7                         | -28.1                         | —               |
|             | S430  | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>       | 0.95           | 3.46            | 95.13           | 0.41                          | 0.04                          | 0.01                           | -32.2           | -33.8                         | -27.4                         | —               |
|             | S398  | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>       | 4.14           | 2.56            | 93.21           | 0.08                          | 0.01                          | —                              | -32.2           | -33.8                         | -27.4                         | —               |
|             | S124  | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>       | 1.82           | 4.27            | 93.63           | 0.25                          | 0.03                          | —                              | -32.5           | -34.3                         | -30.1                         | —               |
|             | S127  | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>    | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -32.7           | -35.7                         | -30.6                         | —               |
|             | S203  | O <sub>1</sub> m <sup>5(5)</sup>    | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -33.4           | -35.4                         | -31.4                         | —               |
|             | S323  | O <sub>1</sub> m <sup>5(4)</sup>    | —              | 6.44            | 93.29           | 0.25                          | 0.02                          | —                              | -34.4           | -36.3                         | -31.3                         | —               |
|             | S373  | O <sub>1</sub> m <sup>5</sup>       | 1.37           | 5.93            | 92.36           | 0.30                          | 0.03                          | —                              | -32.7           | -33.6                         | -25.6                         | —               |
|             | S379  | O <sub>1</sub> m <sup>5(6)</sup>    | 1.75           | 1.08            | 96.80           | 0.10                          | 0.01                          | —                              | -36.5           | -39.4                         | —                             | —               |
|             | S222  | O <sub>1</sub> m <sup>5(5)</sup>    | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -32.7           | -34.2                         | -30.0                         | —               |
|             | S381  | O <sub>1</sub> m <sup>5(5-6)</sup>  | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -36.0           | -34.5                         | —                             | —               |
| 煤成气         | SH5   | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-3)</sup>  | —              | —               | 93.96           | 0.53                          | 0.07                          | 0.01                           | -32.2           | -31.2                         | -25.7                         | -172            |
|             | SH50  | O <sub>1</sub> m <sup>5(1-4)</sup>  | —              | —               | 76.60           | 0.62                          | 0.13                          | —                              | -36.4           | -37.0                         | -38.6                         | -172            |
| 煤成气         | SH137 | O <sub>1</sub> m <sup>5(2)</sup>    | 1.42           | 2.18            | 95.23           | 0.77                          | 0.09                          | —                              | -25.2           | -29.8                         | -30.3                         | -161            |
| 乌拉力克<br>页岩气 | YT1   | O <sub>1</sub> k                    | 0.43           | 1.23            | 94.77           | 2.89                          | 0.39                          | 0.13                           | -38.2           | -28.3                         | -24.7                         | -185            |
|             | Z4    | O <sub>2</sub> w                    | n. d.          | n. d.           | n. d.           | n. d.                         | n. d.                         | n. d.                          | -37.3           | -33.3                         | —                             | —               |
|             | ZT1   | O <sub>1</sub> k                    | 7.76           | 20.11           | 71.26           | 0.36                          | 0.02                          | —                              | -38.0           | -34.0                         | -30.6                         | -171            |

注: CH<sub>4</sub>, 甲烷; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 乙烷; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, 丙烷; C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, 丁烷; N<sub>2</sub>, 氮气; CO<sub>2</sub>, 二氧化碳; C<sub>2</sub>b, 本溪组; P<sub>1</sub>x, 下石盒子组; O<sub>1</sub>w, 乌拉力克组; O<sub>1</sub>k, 克里摩里组; O<sub>1</sub>m<sup>4</sup>, 马家沟组四段; O<sub>1</sub>m<sup>5(10)</sup>, 马家沟组五段<sup>10</sup>亚段; “n. d.”表示未检测数据; “—”表示样品中不含该组分。

## 6.2 原油裂解气

靖边气田存在纯原油裂解气:天然气组分正序分布,跟东部马家沟组盐下高产井相比( $\delta^{13}\text{C} < -40.0\text{‰}$ ),甲烷碳同位素明显较重( $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-39.0\text{‰} \sim -34.0\text{‰}$ ),乙烷碳同位素较轻( $\delta^{13}\text{C} < -30.0\text{‰}$ )。该类天然气在靖边气田中部及北部广有分布(表4),如Ta36井、Ta37井、Ta39井、Ta67井、L19井和L30井等。该区甲烷碳同位素比东部盐下甲烷碳同位素重的现象,前人归因于煤成气混入<sup>[3, 5-6, 9-10, 13, 68]</sup>,然而,S345井和S343井湿气组分分子内同位素特征说明为油型气来源,并无明显煤成气混入(图2)。

在靖边气田中部和北部,分布有长城系和奥陶系马家沟组的烃源岩,它们皆可能对这类天然气的成藏做出贡献。推测有3种可能的成藏模式:①自生自储式,烃源岩为马家沟组盐间泥页岩;②混合气,为马家沟组与长城系两种天然气的混合;③纯长城系烃源岩所生油气。长城系北大尖组烃源岩已获证实,定边裂陷槽Ta59井已钻遇<sup>[23, 34]</sup>,等效 $R_o$ 介于 $1.8\% \sim 2.2\%$ <sup>[34]</sup>,正处于凝析气-湿气窗阶段,与天然气成熟度基本吻合。在该井寒武系发现了这套烃源岩来源的干沥青,平均含量高达 $2.0\%$ (含量介于 $1.1\% \sim 3.0\%$ )<sup>[40]</sup>,证实烃源岩具有良好生油气能力。

考虑到这类天然气均沿大断层分布(图8),推断大多数纯原油裂解气以混合气为主;单纯来自马家沟组源岩的天然气,可能分布在断层不发育区或奥陶系层内断层发育区(如T59井),但多为低产气井或干井。

## 6.3 混合型油型气

靖边气田中部和西部一些井所产天然气干燥系数高,甲烷和乙烷 $\delta^{13}\text{C}$ 倒转,倒转幅度较小(介于 $0 \sim 5.0\text{‰}$ ),甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 一般小于 $-33.0\text{‰}$ 。乙烷 $\delta^{13}\text{C}$ 跟甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 接近或略小,介于 $-36.0\text{‰} \sim -33.0\text{‰}$ ,属于过成熟天然气与原油裂解气的混合(表4)。

在靖边以北区域,Sh11井、Sh44井、Sh52井和Sh222井的天然气呈明显的过成熟天然气混入特征(表3;图7)。该区域的天然气主要为原油裂解气,其特征与奥陶系以及已发现的长城系烃源岩成熟度(处于凝析气-湿气窗范围)相吻合<sup>[69-70]</sup>。如T74井和T75井,乙烷含量介于 $0.8\% \sim 2.0\%$ ,考虑它们曾遭受过TSR破坏( $\text{H}_2\text{S}$ 含量介于 $1.3\% \sim 8.9\%$ ),天然气真实成熟度要更低。基于全球大量页岩气数据判断,天然气组分碳同位素值倒转的成熟度界限一般应在 $R_o$ 为 $2.5\%$ 以上<sup>[71]</sup>。显然,目前已探明的奥陶系和长城系烃源岩成

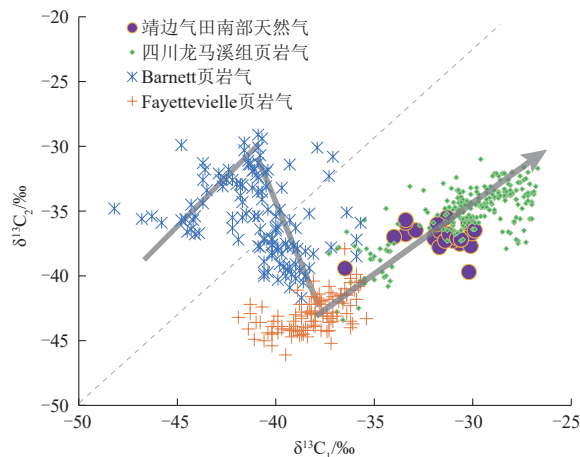


图7 鄂尔多斯盆地靖边气田南部过成熟海相油型气特征  
(其他地区数据参考文献[20, 67])

Fig. 7 Characteristics of over-mature marine oil-associated gas in the southern Jingbian gas field, Ordos Basin (data of other areas after references [20, 67])

$\delta^{13}\text{C}_1$ : 甲烷碳同位素值;  $\delta^{13}\text{C}_2$ : 乙烷碳同位素值

(虚线表示甲烷碳同位素值与乙烷碳同位素值的1:1线,线上方表示天然气同位素值正常分布,线下方则倒转;灰色箭头表示成熟度增加趋势。)

熟度不足以产生具有碳同位素倒转趋势的天然气,由此推断,这种过成熟天然气只能来源于更深层的长城系,而且这类过成熟天然气井通常位于深大断裂附近,深大断裂为深部过成熟天然气的运移和成藏提供了通道。这一现象暗示着,除了钻遇的长城系烃源岩外,深部可能还存在另一套过成熟烃源岩, $R_o$ 超过 $2.5\% \sim 3.0\%$ ,推测该套烃源岩位于下部白草坪组(图8)。这与盆地内长城系发育多套烃源岩的情况相吻合(表1)。综上所述,对于靖边以北区域的这类混合天然气,3套海相烃源岩可能均有贡献,分别为长城系的两套烃源岩(一套为高成熟度,另一套为过成熟度)以及马家沟盐湖相烃源岩。

## 7 勘探前景

深层长城系和寒武系来源的天然气在鄂尔多斯盆地呈现出广泛分布的态势,具备一定的勘探前景。比较具有现实勘探价值的区域包括中央古隆起东部、延安地区以及定边裂陷槽。在这些地区,均有确凿的证据表明存在来自下部地层天然气的贡献。鉴于此,可着手在这些区域开展深层天然气的勘探工作。

目前,上述开展的工作和取得的认识尚处于初步阶段,仍有诸多基础问题亟待解决。例如,不同类型天然气的成藏机制及其主控因素究竟存在怎样的异同?展望未来,需要重点加强对各类天然气成藏过程的深

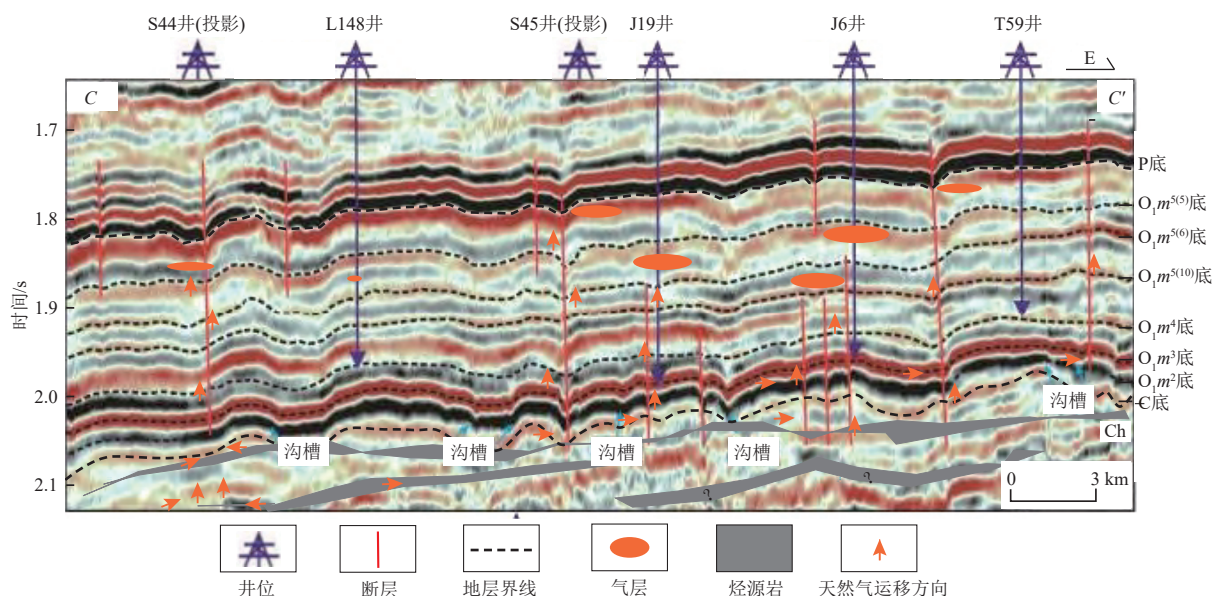


图8 鄂尔多斯盆地靖边气田中、北部海相天然气成藏模式示意图(剖面位置见图1,底图据参考文献[11])

Fig. 8 Section showing the natural gas accumulation pattern within marine strata in the north-central part of the Jingbian gas field, Ordos Basin (see Fig. 1 for the section location; base map after reference [11])

P. 二叠系;  $O_1m^{5(5)}$ . 马五<sup>5</sup>亚段;  $O_1m^{5(6)}$ . 马五<sup>6</sup>亚段;  $O_1m^{5(10)}$ . 马五<sup>10</sup>亚段;  $O_1m^4$ . 马四段;  $O_1m^3$ . 马三段;  $O_1m^2$ . 马二段; C. 寒武系; Ch. 长城系(图中问号表示推测存在于深部的长城系另一套烃源岩。)

入剖析,精准明确不同地区天然气成藏所需的要素以及背后的动力学过程。同时,要全面查明深大断裂的分布情况、活动特性以及其与天然气成藏期的匹配关系。此外,还需精细确定各类油型气的分布范围,精准刻画长城系与寒武系源岩的分布特征。在此基础上,深入探索油气资源的潜在储量,科学预测不同类型天然气的资源规模。期望通过上述工作,为鄂尔多斯盆地乃至中国深层天然气的高效勘探工作提供坚实有力的支撑。

## 8 结论

1) 盆地东部奥陶系马家沟组盐下的天然气属于典型的原油裂解气,受不同程度 TSR 作用的影响,湿气( $C_{2+}$ )组分的碳同位素变重,干燥系数增大。高产井的甲烷碳同位素极轻( $\delta^{13}C < -40.0\%$ ),这与马家沟组盐下烃源岩相对较重的干酪根碳同位素( $\delta^{13}C$  平均值介于  $-28.0\% \sim -26.0\%$ )不匹配。由此推断,该区域天然气有下部寒武系-长城系的贡献,这一贡献弥补了马家沟组烃源岩规模较小的不足。东部海相天然气呈现出深大断裂控藏、多层系立体富集的模式,奥陶系以下很可能发育有古油气藏,具备一定的勘探前景。

2) 海相烃源岩生成的天然气在盆地南部和中、西部广泛分布,涵盖庆阳古隆起及以东地区、靖边气田南

部,甚至靖边气田中部的部分井。这类天然气具有干燥系数高的特点,烷烃气组分发生倒转,且倒转幅度较大( $>5.0\%$ ),甲烷碳同位素较轻( $\delta^{13}C < -32.0\%$ ),属于典型的过成熟油型气。推测其主要烃源岩以长城系为主,在盆地西部和南部,寒武系与奥陶系可能也同时对天然气的形成有贡献。

3) 在靖边气田中北部发现了典型的原油裂解气,其烷烃气  $\delta^{13}C$  呈正序分布,甲烷碳同位素相对较轻,但比东部地区的要重。湿气组分分子内碳同位素特征显示,该类天然气主要源于油型气。这类天然气可能是奥陶系马家沟组烃源岩与长城系高成熟烃源岩所生成天然气混合的产物。此外,在靖边气田中部还发现了由该类气与深部海相过成熟晚期气混合而成的天然气,由此推测,该区域的长城系发育有多套烃源岩。

## 参 考 文 献

- [1] 李建忠,陶小晚,白斌,等. 中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 52-67.  
LI Jianzhong, TAO Xiaowan, BAI Bin, et al. Geological conditions, reservoir evolution and favorable exploration directions of marine ultra-deep oil and gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 52-67.
- [2] 席胜利,刘新社,任军峰,等. 鄂尔多斯盆地风险勘探领域油气成藏认识新进展与勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 34-48.

- XI Shengli, LIU Xinshe, REN Junfeng, et al. New understanding of hydrocarbon accumulation and exploration potential in risk exploration field in Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(3): 34-48.
- [3] 徐旺林, 李建忠, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系下组合天然气成藏条件与勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 549-561.
- XU Wanglin, LI Jianzhong, LIU Xinshe, et al. Accumulation conditions and exploration directions of Ordovician lower assemblage natural gas, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 549-561.
- [4] 付金华, 刘新社, 魏柳斌, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下马家沟组四段天然气勘探突破及意义[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(2): 47-58.
- FU Jinhua, LIU Xinshe, WEI Liubin, et al. Breakthrough and significance of natural gas exploration in the fourth member of Majiagou Formation of subsalt Ordovician in Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(2): 47-58.
- [5] 包洪平, 黄正良, 武春英, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下侧向供烃成藏特征及勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(3): 134-145.
- BAO Hongping, HUANG Zhengliang, WU Chunying, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration potential of Ordovician pre-salt formations by lateral hydrocarbon supply in the central-eastern Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 134-145.
- [6] 党文龙, 高岗, 刘建平, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组盐下天然气成因类型及来源[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(2): 207-217.
- DANG Wenlong, GAO Gang, LIU Jianping, et al. Genetic types and sources of the subsalt natural gas in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(2): 207-217.
- [7] 何海清, 郭绪杰, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下马四段天然气成藏新认识及勘探重大突破[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(3): 429-439.
- HE Haiqing, GUO Xujie, ZHAO Zhenyu, et al. New understandings on gas accumulation and major exploration breakthroughs in subsalt Ma 4 Member of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(3): 429-439.
- [8] 孔庆芬, 姚泾利, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气来源及勘探潜力[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(7): 1187-1201.
- KONG Qingfen, YAO Jingli, REN Junfeng, et al. Sources and exploration potential of Ordovician subsalt natural gas in Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(7): 1187-1201.
- [9] 孔庆芬, 张文正, 李剑锋, 等. 鄂尔多斯盆地靖西地区下古生界奥陶系天然气成因研究[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(1): 71-80.
- KONG Qingfen, ZHANG Wenzheng, LI Jianfeng, et al. Origin of natural gas in Ordovician in the west of Jingbian Gasfield, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 71-80.
- [10] 李芙蓉, 刘文汇, 王晓锋, 等. 鄂尔多斯盆地古生界天然气地球化学特征与成因[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(4): 809-820.
- LI Furong, LIU Wenhui, WANG Xiaofeng, et al. Geochemical characteristics and genesis of Paleozoic natural gas in the Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(4): 809-820.
- [11] 刘新社, 陈平, 李鹏飞, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下气藏特征及断裂、裂缝对气藏高产富集控制作用[J]. *天然气地球科学*, 2025, 36(7): 1183-1193.
- LIU Xinshe, CHEN Ping, LI Pengfei, et al. Characteristics of Ordovician subsalt gas reservoirs in the central and eastern Ordos Basin, and the controlling effects of faults and fractures on the high-yield enrichment of gas reservoirs [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2025, 36(7): 1183-1193.
- [12] 任军峰, 师平平, 张涛, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下含气系统及勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(3): 435-448.
- REN Junfeng, SHI Pingping, ZHANG Tao, et al. Characteristics and exploration potential of Ordovician subsalt gas-bearing system in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(3): 435-448.
- [13] 魏柳斌, 刘文汇, 王前平, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下马四段高含硫天然气地球化学特征及成因[J]. *地质科学*, 2024, 59(3): 683-695.
- WEI Liubin, LIU Wenhui, WANG Qianping, et al. Geochemical characteristics and genesis of high sulfur natural gas in the fourth member of Majiagou Formation in the Ordovician sub-salt reservoirs, Ordos Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2024, 59(3): 683-695.
- [14] 于洲, 范立勇, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系天然气成藏模式及有利勘探区[J]. *天然气工业*, 2024, 44(8): 44-57.
- YU Zhou, FAN Liyong, REN Junfeng, et al. Natural gas accumulation models and favorable exploration areas of the Cambrian-Ordovician in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(8): 44-57.
- [15] 黄军平, 林俊峰, 张艳, 等. 鄂尔多斯盆地南缘下寒武统海相烃源岩有机地球化学特征与成藏贡献[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(3): 461-471.
- HUANG Junping, LIN Junfeng, ZHANG Yan, et al. The organic geochemical characteristics of Lower Cambrian marine source rocks and its contribution to hydrocarbon accumulation in the southern margin of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(3): 461-471.
- [16] 杜金虎, 李相博, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地中新元古界—下古生界天然气成藏地质条件及勘探新领域[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(5): 820-835.
- DU Jinhu, LI Xiangbo, BAO Hongping, et al. Geological conditions of natural gas accumulation and new exploration areas in the Mesoproterozoic to Lower Paleozoic of Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(5): 820-835.
- [17] 赵喆, 徐旺林, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(2): 234-247, 259.
- ZHAO Zhe, XU Wanglin, ZHAO Zhenyu, et al. Geological

- characteristics and exploration breakthroughs of coal rock gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51 (2): 234–247, 259.
- [18] 帅燕华, 彭平安, 陶小晚, 等. 丙烷分子内碳同位素示踪作用[J]. *科学通报*, 2023, 68(36): 4995–5008.  
SHUAI Yanhua, PENG Ping'an, TAO Xiaowan, et al. Intramolecular C isotope distributions in propane from natural gases and produced in the laboratory [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(36): 4995–5008.
- [19] SHUAI Yanhua, ANADU J, EILER J, et al. Ethane clumped isotopes as tracers of kerogen type, chemical oxidation, and thermal cracking[Z]. In preparation for submission to *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
- [20] SHUAI Yanhua, BAI Bin, LIU Xinshe, et al. Position-specific carbon isotopes of propane in coal systems in China [J]. *Fuel*, 2024, 360: 130515.
- [21] 刘刚, 杨文敬, 并向辉, 等. 鄂尔多斯盆地中元古界长城系地质特征与勘探前景[J]. *中国石油勘探*, 2024, 29(5): 44–60.  
LIU Gang, YANG Wenjing, JING Xianghui, et al. Geological characteristics and exploration prospects of the Mesoproterozoic Changcheng System in Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(5): 44–60.
- [22] 陈思谦, 周义军, 郭庆, 等. 鄂尔多斯盆地中新元古界拗拉槽特征及勘探潜力[J]. *地质科学*, 2020, 55(3): 692–702.  
CHEN Siqian, ZHOU Yijun, GUO Qing, et al. Characteristics and exploration potential of the Mid-Late Proterozoic aulacogens in Ordos Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55 (3): 692–702.
- [23] 郭彦如, 赵振宇, 张月巧, 等. 鄂尔多斯盆地海相烃源岩系发育特征与勘探新领域[J]. *石油学报*, 2016, 37(8): 939–951, 1068.  
GUO Yanru, ZHAO Zhenyu, ZHANG Yueqiao, et al. Development characteristics and new exploration areas of marine source rocks in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37 (8): 939–951, 1068.
- [24] 冯娟萍, 姚韦卓, 欧阳征健, 等. 鄂尔多斯盆地北缘书记沟中元古界长城系烃源岩地质特征[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(6): 950–960.  
FENG Juanping, YAO Weizhuo, OUYANG Zhengjian, et al. Geological characteristics of source rocks of Mesoproterozoic Changchengian System in Shujigou area of the northern margin of Ordos Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 54(6): 950–960.
- [25] 胡安平, 沈安江, 张杰, 等. 碳酸盐岩-膏盐岩高频沉积旋回组合生-储特征——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中-下组合为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 943–956.  
HU Anping, SHEN Anjiang, ZHANG Jie, et al. Source-reservoir characteristics of high-frequency cyclic carbonate-evaporite assemblages: A case study of the lower and middle assemblages in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 943–956.
- [26] 刘丹, 冯子齐, 刘洋, 等. 鄂尔多斯盆地中东部下古生界奥陶系自生自储气地球化学特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27 (10): 1892–1903.
- LIU Dan, FENG Ziqi, LIU Yang, et al. Geochemistry of the self-generated and self-accumulated gas of Lower Paleozoic in Ordos Basin, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27 (10): 1892–1903.
- [27] 刘新社, 杨智, 魏柳斌, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下马四段高含硫天然气成藏特征与勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2024, 44 (11): 50–59.
- LIU Xinshe, YANG Zhi, WEI Liubin, et al. Accumulation characteristics and exploration potential of high-sulfur gas in the Ma 4 Member of Ordovician subsalt, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(11): 50–59.
- [28] 欧阳征健, 冯娟萍, 姚韦卓, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘寒武系烃源岩地质特征及有利区带优选[J]. *地质科学*, 2023, 58 (4): 1291–1308.  
OUYANG Zhengjian, FENG Juanping, YAO Weizhuo, et al. Characteristics and favorable areas of Cambrian natural gas reservoirs in Ordos Basin and its periphery areas [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2023, 58(4): 1291–1308.
- [29] 潘星. 鄂尔多斯盆地南缘中-新元古代成源环境与有机质富集机制[D]. 西安: 西北大学, 2021.  
PAN Xing. Sedimentary environments and mechanism of organic matter enrichment of the Meso-Newoproterozoic Era in the Southern Margin of Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [30] 王晓锋, 冯丹婷, 刘文汇, 等. 高演化碳酸盐岩烃源岩生烃演化特征与评价方法[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2022, 52 (6): 957–967.  
WANG Xiaofeng, FENG Danting, LIU Wenhui, et al. Hydrocarbon generation characteristics and evaluation methods of highly maturity carbonate source rocks [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(6): 957–967.
- [31] 席胜利, 刘新社, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统乌拉力克组页岩油气富集条件及勘探方向[J]. *天然气工业*, 2023, 43 (3): 12–22.  
XI Shengli, LIU Xinshe, HUANG Zhengliang, et al. Enrichment characteristics and exploration direction of shale oil and gas in Wulalike Formation of Middle Ordovician in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(3): 12–22.
- [32] 丁蓉, 庞雄奇, 贾承造, 等. 鄂尔多斯盆地石炭纪—二叠纪煤系全油气系统天然气成藏特征与有序分布模式[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(4): 1333–1348.  
DING Rong, PANG Xiongqi, JIA Chengzao, et al. Natural gas accumulation characteristics and orderly distribution pattern of gas reservoirs in the whole petroleum system of the Carboniferous-Permian coal measures, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(4): 1333–1348.
- [33] 白海峰, 包洪平, 李泽敏, 等. 鄂尔多斯盆地元古界长城系沉积特征及天然气成藏潜力[J]. *地质科学*, 2020, 55(3): 672–691.  
BAI Haifeng, BAO Hongping, LI Zemin, et al. Sedimentary characteristics and gas accumulation potential of Changcheng System in Ordos Basin in Proterozoic [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(3): 672–691.
- [34] 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 中国元古界—寒武系油气地质

- 条件与勘探地位[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 1-13.
- ZHAO Wenzhi, HU Suyun, WANG Zecheng, et al. Petroleum geological conditions and exploration importance of Proterozoic to Cambrian in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 1-13.
- [35] 周进高, 席胜利, 邓红婴, 等. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深层海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 41-53.
- ZHOU Jingao, XI Shengli, DENG Hongying, et al. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian-Ordovician deep marine carbonate rocks in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 41-53.
- [36] 郝松立, 孙六一, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地中—新元古界勘探方向及潜力[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(12): 2127-2135.
- HAO Songli, SUN Liuyi, BAO Hongping, et al. Exploration direction and potential of the Middle-Upper Proterozoic in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(12): 1672-1926.
- [37] 魏国齐, 朱秋影, 杨威, 等. 鄂尔多斯盆地南缘寒武纪铜川裂陷的发现及油气地质意义[J]. 石油学报, 2022, 43(9): 1223-1235.
- WEI Guoqi, ZHU Qiuying, YANG Wei, et al. Geological characteristics and petroleum geological significance of Cambrian Tongchuan rift in the southern margin of Ordos Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2022, 43(9): 1223-1235.
- [38] 包洪平, 师平平, 张建伍, 等. 鄂尔多斯盆地寒武纪构造—古地理演化与天然气成藏潜力[J]. 地质学报, 2024, 98(12): 3530-3551.
- BAO Hongping, SHI Pingping, ZHANG Jianwu, et al. Tectonic-paleogeographic evolution and potential of natural gas accumulation of the Cambrian in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(12): 3530-3551.
- [39] 吴东旭, 范立勇, 李维岭, 等. 鄂尔多斯盆地寒武纪—奥陶纪构造—岩相古地理及其控源控储效应[J]. 海相油气地质, 2024, 29(4): 348-360.
- WU Dongxu, FAN Liyong, LI Weiling, et al. Evolution and controlling effects on source rock and reservoir of tectonics lithofacies paleogeography of Cambrian-Ordovician in the Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2024, 29(4): 348-360.
- [40] 黄军平, 井向辉, 张艳, 等. 鄂尔多斯盆地寒武系储层沥青地质特征及来源分析[J]. 地质学报, 2024, 98(10): 3134-3148.
- HUANG Junping, JING Xianghui, ZHANG Yan, et al. Geological characteristics and origin analysis of bitumen in Cambrian reservoirs of Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(10): 3134-3148.
- [41] 魏新善, 魏柳斌, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地地下古生界风化壳气藏差异性[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(2): 178-188.
- WEI Xinshan, WEI Liubin, REN Junfeng, et al. Differential distribution of natural gas in the Lower Paleozoic paleokarst gas reservoir, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(2): 178-188.
- [42] TANG Y, PERRY J K, JENDEN P D, et al. Mathematical modeling of stable carbon isotope ratios in natural gases[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(15): 2673-2687.
- [43] 杨泽光, 王爱国, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下储层中固体沥青的发现及其对天然气成藏的启示[J]. 天然气工业, 2024, 44(2): 68-80.
- YANG Zeguang, WANG Aiguo, FAN Liyong, et al. Discovery of solid bitumen in the Ordovician pre-salt reservoirs of the Ordos Basin and its implications for natural gas accumulation[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(2): 68-80.
- [44] TANG Shuling, TANG Dazhen, LI Song, et al. Geochemical characteristics and origin of natural gas and gas -filling mode of the Paleozoic in the Yanchuannan Gas Field, Ordos Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 49: 286-297.
- [45] 孟强, 史江龙, 赵恒, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组米探1井天然气成因与来源[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(10): 1696-1709.
- MENG Qiang, SHI Jianglong, ZHAO Heng, et al. Genesis and source of natural gas in Well Mitan-1 of Ordovician Majiagou Formation, middle-eastern Ordos Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(10): 1696-1709.
- [46] 牛小兵, 范立勇, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系盐下缝洞体天然气勘探突破及其意义[J]. 石油学报, 2024, 45(12): 1715-1727, 1817.
- NIU Xiaobing, FAN Liyong, REN Junfeng, et al. Breakthrough and significance of natural gas exploration for Ordovician subsalt fracture-cavities in Ordos Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2024, 45(12): 1715-1727, 1817.
- [47] 张洁, 贾连奇, 范立勇, 等. 乌审旗地区盐下奥陶系流体来源及其油气意义[J]. 沉积学报, 2025, 43(6): 2249-2263.
- ZHANG Jie, JIA Lianqi, FAN Liyong, et al. The source of the pre-salt Ordovician fluid and its significance for hydrocarbon in Wushenqi area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, 43(6): 2249-2263.
- [48] 党文龙. 鄂尔多斯盆地马家沟组内幕天然气成因与烃源条件[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- DANG Wenlong. Genesis of natural gas and source rock conditions in the inner Majiagou Formation, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [49] 魏国齐, 张本健, 谢增业, 等. 深层超深层碳酸盐岩特大型气田形成主控因素——以四川盆地安岳和蓬莱气田为例[J]. 中国石油勘探, 2025, 30(2): 1-15.
- WEI Guoqi, ZHANG Benjian, XIE Zengye, et al. Main controlling factors for the formation of deep to ultra-deep carbonate giant gas fields: A case study of Anyue and Penglai gas fields in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2025, 30(2): 1-15.
- [50] 帅燕华, 李剑, 田兴旺, 等. 四川盆地川中—川西震旦系—三叠系天然气成藏分析及勘探意义[J]. 地质学报, 2023, 97(5): 1526-1543.
- SHUAI Yanhua, LI Jian, TIAN Xingwang, et al. Accumulation mechanisms of Sinian to Triassic gas reservoirs in the central and western Sichuan Basin and their significance for oil and gas prospecting[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(5): 1526-1543.
- [51] 李福奇, 王晓锋, 刘文汇, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩气地球化学特征与成因[J]. 天然气地球科学,

- 2024, 35(9): 1626–1637.
- LI Fuqi, WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, et al. Geochemical characteristics and genesis of shale gas in the Ordovician Wulalik Formation in the western Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 35(9): 1626–1637.
- [52] 王杰, 贾会冲, 孙晓, 等. 鄂尔多斯盆地富县古生界天然气成因及气源综合识别[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(9): 1476–1484.
- WANG Jie, JIA Huichong, SUN Xiao, et al. Comprehensive evaluation on origin and source of natural gas in the Paleozoic in Fuxian area, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(9): 1476–1484.
- [53] FENG Ziqi, DONG Dazhong, TIAN Jinqiang, et al. Geochemical characteristics of the Paleozoic natural gas in the Yichuan-Huanglong area, southeastern margin of the Ordos Basin: Based on late gas generation mechanisms [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 124: 104867.
- [54] 刘显阳, 魏柳斌, 刘宝宪, 等. 鄂尔多斯盆地西南部寒武系风化壳天然气成藏特征[J]. *天然气工业*, 2021, 41(4): 13–21.
- LIU Xianyang, WEI Liubin, LIU Baoxian, et al. Characteristics of natural gas accumulation in the Cambrian weathering crust in the southwestern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(4): 13–21.
- [55] 刘新社, 蒋有录, 侯云东, 等. 鄂尔多斯盆地靖西地区奥陶系中组合天然气成因与成藏主控因素[J]. *天然气工业*, 2016, 36(4): 16–26.
- LIU Xinshe, JIANG Youlu, HOU Yundong, et al. Origins of natural gas and the main controlling factors of gas accumulation in the Middle Ordovician assemblages in the Jingxi area, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(4): 16–26.
- [56] 张涛, 王晓锋, 金晓辉, 等. 鄂尔多斯盆地南部古生界天然气地球化学特征与成因[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(9): 1616–1625.
- ZHANG Tao, WANG Xiaofeng, JIN Xiaohui, et al. Geochemical characteristics and genesis of Paleozoic natural gas in the southern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(9): 1616–1625.
- [57] 戴金星. 中国煤成气研究30年来勘探的重大进展[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(3): 264–279.
- DAI Jinxing. Major developments of coal-formed gas exploration in the last 30 years in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(3): 264–279.
- [58] DAI Jinxing, LI Jian, LUO Xia, et al. Stable carbon isotope compositions and source rock geochemistry of the giant gas accumulations in the Ordos Basin, China [J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(12): 1617–1635.
- [59] 刘成林, 丁振刚, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地含氮天然气地球化学特征与富集影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 384–392.
- LIU Chenglin, DING Zhengang, FAN Liyong, et al. Geochemical characteristics and enrichment factors of helium-bearing natural gas in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 384–392.
- [60] 赵喆, 刘新社, 杨文敬, 等. 鄂尔多斯盆地油气勘探新区新领域进展与方向思考[J]. *地质学报*, 2025, 99(12): 4295–4312.
- ZHAO Zhe, LIU Xinshe, YANG Wenjing, et al. Progress and direction thinking of oil and gas exploration in new areas and new fields of Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2025, 99(12): 4295–4312.
- [61] HAN Wenxue, CHANG Xiangchun, MA Weijiao, et al. Geochemical characteristics and reasons for the carbon isotopic reversal of natural gas in the southern Jingbian Gas Field, Ordos Basin, China [J]. *Geological Magazine*, 2020, 157(4): 527–538.
- [62] HAN Wenxue, CHANG Xiangchun, TAO Shizhen, et al. Geochemical characteristics and genesis of pre-salt gases in the Ordos Basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 179: 92–103.
- [63] LI Jian, LI Jin, LI Zhisheng, et al. Characteristics and genetic types of the Lower Paleozoic natural gas, Ordos Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 89(Part 1): 106–119.
- [64] LI Jijun, SONG Ziwei, ZHANG Chunlin, et al. Study of the gas sources of the Ordovician gas reservoir in the Central-Eastern Ordos Basin [J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(3): 949–962.
- [65] WANG Ke, PANG Xiongqi, ZHAO Zhengfu, et al. Geochemical characteristics and origin of natural gas in southern Jingbian Gas Field, Ordos Basin, China [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 46: 515–525.
- [66] YANG Shangru, GANG Wenzhe, CAO Jingjing, et al. Geochemical characteristics, origin and carbon isotope reversal of the presalt natural gas in the Lower Paleozoic Ordovician carbonates, Ordos Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 139: 105577.
- [67] ZUMBERGE J, FERWORN K, BROWN S. Isotopic reversal (‘rollover’) in shale gases produced from the Mississippian Barnett and Fayetteville formations [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 31(1): 43–52.
- [68] 周进高, 李明瑞, 吴东旭, 等. 鄂尔多斯盆地东部下奥陶统马家沟组盐下含气系统特征与勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2023, 43(3): 34–45.
- ZHOU Jingao, LI Mingrui, WU Dongxu, et al. Characteristics and exploration potential of subsalt gas-bearing system in Majiagou Formation of Middle Ordovician in the eastern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(3): 34–45.
- [69] 田刚, 宋立军. 鄂尔多斯盆地中元古界烃源岩热演化史模拟[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(4): 520–526.
- TIAN Gang, SONG Lijun. Thermal evolution modeling of Mesoproterozoic source rocks in the Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2017, 39(4): 520–526.
- [70] TAO Hua, CUI Junping, ZHAO Fanfan, et al. Thermal history and hydrocarbon accumulation stages in Majiagou Formation of Ordovician in the East-Central Ordos Basin [J]. *Energies*, 2024, 17(17): 4435.
- [71] CESAR J, NIGHTINGALE M, BECKER V, et al. Stable carbon isotope systematics of methane, ethane and propane from low-permeability hydrocarbon reservoirs [J]. *Chemical Geology*, 2020, 558: 119907.