

# 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区 上古生界天然气成因及来源

倪春华<sup>1,2</sup>, 刘光祥<sup>2</sup>, 朱建辉<sup>2</sup>, 吴小奇<sup>2</sup>, 包建平<sup>1</sup>

(1. 长江大学 地球环境与水资源学院, 武汉 430100;

2. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

**摘要:**鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界天然气化学组成、稳定碳氢同位素等综合分析结果表明, 该区天然气以烃类气体为主, 干燥系数介于0.80~0.94, 表现为湿气特征;  $\delta^{13}\text{C}_1$  和  $\delta^{13}\text{C}_2$  值分别为-36.2‰~-31.7‰和-27.8‰~-23.3‰,  $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  值为-199‰~-172‰, 烷烃气碳、氢同位素总体呈现正序特征, 属于有机成因气。天然气成因鉴别和气—源对比表明, 该区上古生界天然气主体属于煤成气, 来自太原组—山西组煤系烃源岩, 但泊尔江海子断裂南北两侧天然气的来源存在差异性, 南侧十里加汗区带天然气来自原地的太原组—山西组高成熟烃源岩; 而北侧什股壕区带天然气则主要由断裂以南十里加汗等地区运移而来, 且后期遭受一定程度的破坏而发生逸散。

**关键词:**地球化学特征; 天然气成因; 上古生界; 杭锦旗地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.114

文献标识码: A

## Origin and source of natural gas in the Upper Paleozoic in Hangjinqi area, Ordos Basin

NI Chunhua<sup>1,2</sup>, LIU Guangxiang<sup>2</sup>, ZHU Jianhui<sup>2</sup>, WU Xiaoqi<sup>2</sup>, BAO Jianping<sup>1</sup>

(1. School of Earth Environment and Water Resources, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

**Abstract:** The analyses of the chemical composition, stable carbon and hydrogen isotopes as well as noble gas isotopes of natural gas from the Upper Paleozoic in the Hangjinqi area of Ordos Basin showed that the natural gas was mainly composed of hydrocarbon gas, which appeared to be wet gas with a dryness coefficient from 0.80 to 0.94, lower than 0.95. The  $\delta^{13}\text{C}_1$  and  $\delta^{13}\text{C}_2$  values range -36.2‰ - -31.7‰ and -27.8‰ - -23.3‰, respectively, and the  $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  values range -199‰ - -172‰. The carbon and hydrogen isotopes of alkane gas are generally characterized by positive sequence, indicating for an organic origin. Gas origin identification and gas-source correlation indicated that the natural gas from the Upper Paleozoic is coal-derived gas with a normal to high maturity and was sourced from coal-measure source rocks in the Taiyuan-Shanxi formations. There are some obvious differences of gas-source to the south and the north of the Boerjianghaizi Fault. The natural gas in the Shilijiahan play in the south was derived from the  $\text{P}_1t$ - $\text{P}_1s$  source rocks in situ with a high maturity, whereas the natural gas in the Shiguhao play in the north was mainly sourced from the Shilijiahan area, and then suffered a certain degree of damage and escaped.

**Key words:** geochemical characteristics; origin and source of natural gas; Upper Paleozoic; Hangjinqi area; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地中北部地区是我国天然气勘探开发的主战场之一, 相继发现了苏里格、榆林、靖边、乌审旗、大牛地、子洲等多个探明储量超千亿方的大型气田<sup>[1-4]</sup>。学者研究普遍认为上古生界天

然气属于煤成气, 气源岩为上古生界海陆过渡相煤系烃源岩<sup>[4-6]</sup>。

杭锦旗地区位于鄂尔多斯盆地北部, 近年来该地区上古生界天然气勘探取得一系列突破, 泊尔江

海子断裂以北什股壕区带发现东胜(杭锦旗)气田,断裂以南十里加汗区带储量规模不断扩大,下二叠统下石盒子组和山西组致密砂岩为其主要含气层位<sup>[7]</sup>。前人对杭锦旗地区的构造演化、烃源特征、成藏条件等进行了研究<sup>[7-11]</sup>,但对于泊尔江海子断裂两侧,尤其是断裂北侧什股壕区带上古生界天然气来源仍存在分歧<sup>[12-14]</sup>。本文通过上古生界天然气组分、稳定碳氢同位素组成和稀有气体同位素等地球化学特征分析,结合区域地质条件认识,进一步明确杭锦旗地区(不同区带)上古生界天然气的成因及来源。

## 1 地质背景

杭锦旗地区处于鄂尔多斯盆地北部盆缘过渡带,横跨伊盟隆起和伊陕斜坡2个构造单元(图1a),面积为9 825 km<sup>2</sup>。区内主要发育3条近东西向展布的主干断裂,自西向东依次为三眼井断裂、乌兰吉林庙断裂和泊尔江海子断裂。根据构造形态、断裂分布特征等,该区划分为什股壕、十里加汗等区带(图1b)<sup>[15]</sup>,目前天然气勘探开发重点集中于泊尔江海子断裂两侧的什股壕区带和十里加汗区带。

杭锦旗地区上古生界自下而上依次为太原组(P<sub>1t</sub>)、山西组(P<sub>1s</sub>)、下石盒子组(P<sub>1x</sub>)、上石盒子组(P<sub>2sh</sub>)和石千峰组(P<sub>3s</sub>),太原组、山西组煤系地层为该区上古生界主要烃源岩,且呈南厚北薄的平面分布特征<sup>[9]</sup>,并以Ⅲ型干酪根为主;成熟度自北向南增大,主体介于0.80%~1.40%之间,断裂以南R<sub>o</sub>一般高于1.30%,而断裂以北普遍低于1.10%<sup>[9]</sup>。下石盒子组致密砂岩为该区的主要储集层,其下部的山西组、太原组为次要储集层。上石盒子组和石千峰组发育大套泥岩,能够为天然气

提供有效封盖,纵向上亦形成多套生储盖组合。

## 2 分析方法

本次采用双阀门高压不锈钢瓶,采集了杭锦旗地区上古生界21件天然气样品。天然气组分、碳、氢稳定同位素和稀有气体同位素的测试工作由中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心地球化学测试部完成。其中,天然气组分分析采用GC9160型气相色谱仪;碳同位素分析采用MAT271型质谱仪,分析精度为±0.5‰,标准为VPDB;氢同位素分析采用Thermo Scientific DeltaV Advantage同位素质谱仪进行,分析精度为±3‰,标准为VSMOW;稀有气体同位素分析采用Noblesse型稀有气体同位素质谱仪。测试结果见表1。

## 3 天然气地球化学特征

### 3.1 天然气组分特征

天然气组分测试结果(表1)显示,杭锦旗地区上古生界天然气以烃类气体为主,甲烷含量为77.92%~93.72%,其中十里加汗和新召区带平均值分别为90.04%和90.43%,而泊尔江海子断裂以北什股壕区带平均值为85.99%。该地区上古生界天然气干燥系数(C<sub>1</sub>/C<sub>1-5</sub>)为0.802~0.943,普遍低于0.95,总体表现为湿气特征。

非烃气体含量方面,所有天然气样品中均未检测到H<sub>2</sub>S,且CO<sub>2</sub>含量明显较低,其含量介于0~0.45%之间,而N<sub>2</sub>含量相对较高,主体介于0.16%~1.92%之间,只有J66P2S和J55两个样品中N<sub>2</sub>含量明显偏高,分别为7.18%和6.76%,可能与氮气气举工艺有关,但这不影响天然气中烷烃气的碳、氢同位素组成,因而不影响天然气的成因鉴别和气—源对比<sup>[16]</sup>。

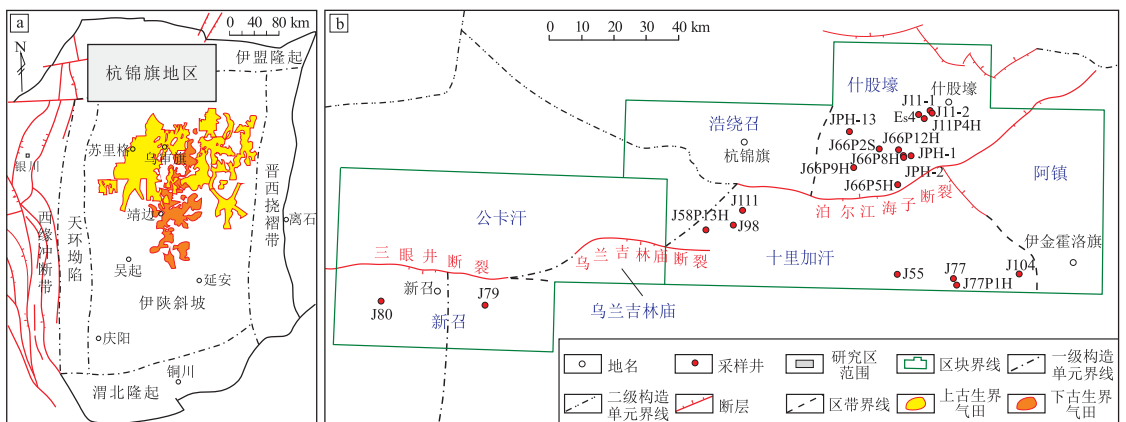


图1 鄂尔多斯盆地构造单元区划(a)和杭锦旗地区天然气采样井位分布(b)

Fig.1 Tectonic units of the Ordos Basin (a) and sampling wells of natural gas in Hangjinqi area (b)

表 1 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界天然气组分、碳、氢同位素和稀有气体同位素组成

Table 1 Compositions, carbon and hydrogen isotopes as well as noble gas isotopes of natural gas from the Upper Paleozoic in Hangjinqi area, Ordos Basin

区带	井号	层位	组分含量/%				$\delta^{13}C_{VPDB}/\text{‰}$			$\delta D_{VSMOW}/\text{‰}$			稀有气体同位素		
			CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> /C <sub>1-5</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>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He	<sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	
什股壕	J66P2S	P <sub>1s</sub>	84.56	5.77	7.18	0.917	-33.6	-26.1	-24.0	-172					
	J66P5H	P <sub>1x</sub>	93.22	4.33	0.84	0.942	-32.9	-24.5	-22.9	-191	-170	-156			
	J66P9H	P <sub>1x</sub>	86.57	7.84	0.31	0.875	-32.8	-27.4	-19.5	-190	-164	-126			
	J66P8H	P <sub>1x</sub>	84.35	8.32	0.25	0.853	-32.7	-26.0	-22.7	-187	-161	-124			
	J66P12H	P <sub>1x</sub>	89.54	6.61	0.25	0.898	-32.6	-26.6	-21.3	-180	-157	-131			
	JPH-1	P <sub>1x</sub>	77.92	10.85	1.57	0.802	-32.4	-26.0	-22.6	-187	-154				
	JPH-2	P <sub>1x</sub>	86.57	7.84	0.31	0.875	-32.0	-25.1	-22.3	-185	-151				
	JPH-13	P <sub>1x</sub>	87.28	7.36	0.27	0.882	-32.7	-26.6	-23.0	-191	-148				
	J11P4H	P <sub>1x</sub>	86.49	7.81	0.26	0.873	-31.9	-26.4	-20.9	-186	-165				
	J11-2	P <sub>1x</sub>	81.81	10.68	0.25	0.824	-31.8	-24.6	-23.2	-186	-155	2.03×10 <sup>-8</sup>	902.1		
	ES4	P <sub>1x</sub>	86.04	7.93	0.26	0.867	-31.8	-24.8	-22.5	-184	-138	2.22×10 <sup>-8</sup>	1 123.5		
J11-1	P <sub>1x</sub>	87.60	7.22	0.21	0.883	-31.7	-26.9	-22.0	-184	-157	-116				
十里加汗	J77	P <sub>1x</sub>	89.47	6.18	0.77	0.906	-34.7	-24.7	-25.0	-199	-171	-176			
	J77P1H	P <sub>1x</sub>	90.04	6.49	0.24	0.903	-34.3	-25.6	-23.4	-198	-160	-122	4.24×10 <sup>-8</sup>	1 303.9	
	J111	P <sub>1x</sub>	90.88	5.47	0.42	0.916	-32.4	-26.5	-23.3	-185	-159	-109			
	J58P13H	P <sub>1x</sub>	93.72	3.77	0.46	0.943	-32.8	-27.6	-21.3	-182	-132		2.30×10 <sup>-8</sup>	563	
	J98	P <sub>1x</sub>	92.67	4.63	0.16	0.932	-32.8	-27.8	-19.5	-185	-150	-126			
	J104	P <sub>1x</sub>	90.02	5.31	1.10	0.917	-35.1	-27.6	-24.7				2.01×10 <sup>-8</sup>	1 231.5	
新召	J55	P <sub>1x</sub>	83.48	7.14	6.76	0.896	-36.2	-24.8	-26.4						
	J80	P <sub>1s</sub>	90.32	4.87	1.92	0.934	-31.7	-23.3	-23.1	-187	-164				
	J79	P <sub>1x</sub>	90.54	5.54	1.14	0.916	-33.0	-23.4	-23.4	-195	-180				

3.2 烷烃气碳同位素特征

杭锦旗地区上古生界天然气中烷烃气  $\delta^{13}C_1$  和  $\delta^{13}C_2$  值分布较为集中(图 2a), 分别介于 -36.2‰ ~ -31.7‰ 和 -27.8‰ ~ -23.3‰, 而丙烷碳同位素值相对分散, 其  $\delta^{13}C_3$  值为 -26.4‰ ~ -19.5‰。就不同区带而言, 什股壕和新召区带烷烃气碳同位素值分布较窄, 而十里加汗区带烷烃气碳同位素值则表现出较宽的分布范围。

杭锦旗地区上古生界烷烃气碳同位素分布主

体表现为正碳序列( $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$ ), 具有典型有机成因气的特征, 与鄂尔多斯盆地其他地区上古生界天然气的地球化学特征一致<sup>[2]</sup>。

3.3 烷烃气氢同位素特征

杭锦旗地区上古生界天然气甲烷氢同位素值分布范围相对较窄(图 2b),  $\delta D_{CH_4}$  值为 -199‰ ~ -172‰, 而乙烷和丙烷氢同位素值的分布则相对分散,  $\delta D_{C_2H_6}$  和  $\delta D_{C_3H_8}$  值分别为 -180‰ ~ -132‰ 和 -176‰ ~ -109‰, 且烷烃气氢同位素系列总体表现

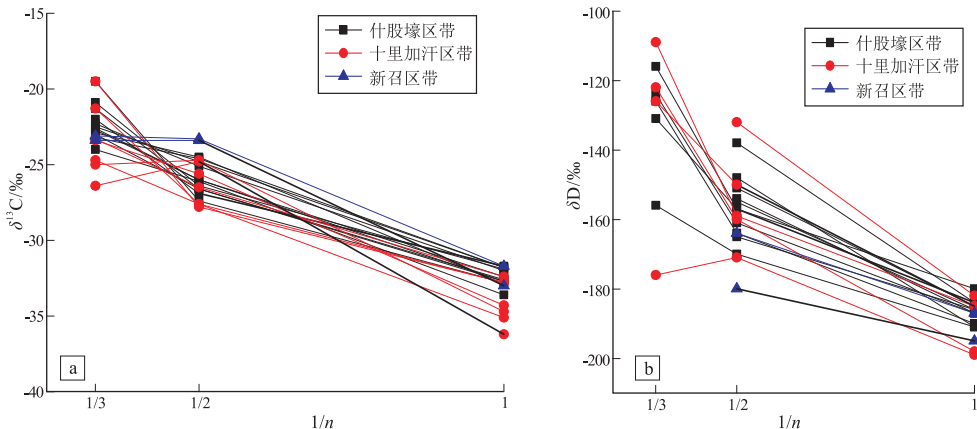


图 2 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界天然气  $\delta^{13}C_n - 1/n$  (a) 和  $\delta D - 1/n$  (b) 关系

Fig.2 Correlation of  $\delta^{13}C_n$  with  $1/n$  (a) and  $\delta D$  with  $1/n$  (b) for natural gas from the Upper Paleozoic in Hangjinqi area, Ordos Basin

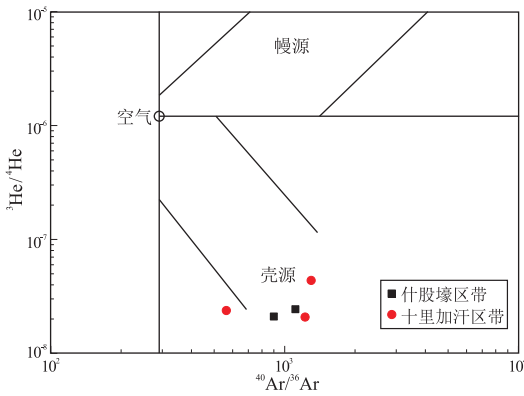


图 3 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区  
上古生界天然气<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar-<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 关系  
底图据参考文献[17]。

Fig.3 Correlation of <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar with <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He for natural gas from the Upper Paleozoic in Hangjinqi area, Ordos Basin

为正序特征 ( $\delta D_{CH_4} < \delta D_{C_2H_6} < \delta D_{C_3H_8}$ )。

### 3.4 稀有气体同位素特征

稀有气体包括轻稀有气体和重稀有气体, 以前者的应用研究居多<sup>[17-18]</sup>。杭锦旗地区上古生界天然气<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 比值为 562.99~1303.94, <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值为  $(2.01 \sim 4.24) \times 10^{-8}$ , 反映其为典型的壳源天然气<sup>[18]</sup>(图 3)。

## 4 天然气成因及来源

有机成因气的烷烃气碳同位素组成具有正碳序列 ( $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$ ), 甲烷碳同位素值一般小于 -30‰, 而无机成因气则与之相反<sup>[19]</sup>。杭锦旗地区上古生界天然气中烷烃气碳、氢同位素总体均表现为正序特征(表 1, 图 2), 甲烷碳同位素值全部小于 -30‰, 故属于典型的有机成因气; 甲烷碳同位素相对较重, 主体处于 -35‰~-30‰ 范围, 表现为热成因气特征(图 4)。天然气与典型 III 型干酪根生成的天然气特征一致, 呈现出煤成气的特征(图 5)。甲烷氢同位素主体分布于 -190‰~-180‰ 范围, 根据  $\delta D_{CH_4}$  值对于沉积环境的判别标准<sup>[22]</sup>, 判断其成烃母质发育于海陆过渡相半咸水环境, 与鄂尔多斯盆地晚古生代的区域沉积背景相吻合<sup>[12]</sup>。

与甲烷碳同位素相比, 乙烷等重烃气碳同位素具有较好的原始母质继承性, 且受成熟度影响较小, 可用作鉴别煤成气和油型气的有效指标。一般根据乙烷碳同位素值  $\delta^{13}C_2$  和丙烷碳同位素值  $\delta^{13}C_3$  分别大于 -28‰ 和 -25‰ 时, 判识天然气为煤成气, 反之则为油型气<sup>[23]</sup>。杭锦旗地区上古生界天然气  $\delta^{13}C_2$  为 -27.8‰~-23.3‰,  $\delta^{13}C_3$  为 -25.0‰~

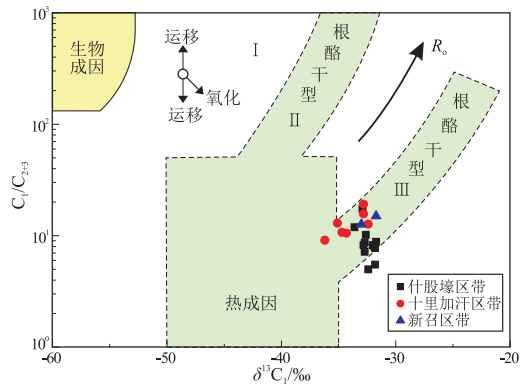


图 4 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区  
上古生界天然气 C<sub>1</sub>/C<sub>2+3</sub>- $\delta^{13}C_1$  关系  
底图据参考文献[20]。

Fig.4 Correlation of C<sub>1</sub>/C<sub>2+3</sub> with  $\delta^{13}C_1$  for natural gas from the Upper Paleozoic in Hangjinqi area, Ordos Basin

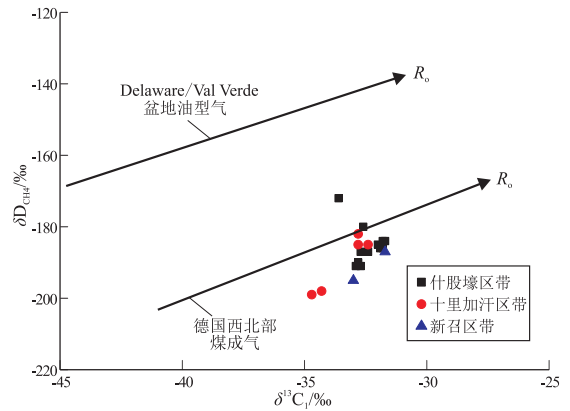


图 5 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区  
上古生界天然气  $\delta D_{CH_4}$ - $\delta^{13}C_1$  关系  
底图据参考文献[21]。

Fig.5 Correlation of  $\delta D_{CH_4}$  with  $\delta^{13}C_1$  for natural gas from the Upper Paleozoic in Hangjinqi area, Ordos Basin

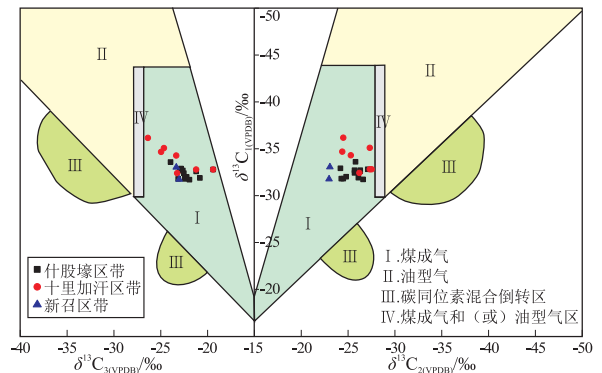


图 6 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区  
上古生界天然气  $\delta^{13}C_2$ - $\delta^{13}C_3$ - $\delta^{13}C_1$  关系  
底图据参考文献[2]。

Fig.6 Correlation of  $\delta^{13}C_2$  and  $\delta^{13}C_3$  with  $\delta^{13}C_1$  for natural gas from the Upper Paleozoic in Hangjinqi area, Ordos Basin

-19.5‰, 故该区上古生界天然气为煤成气(图 6), 来源于太原组—山西组煤系烃源岩(图 7)。

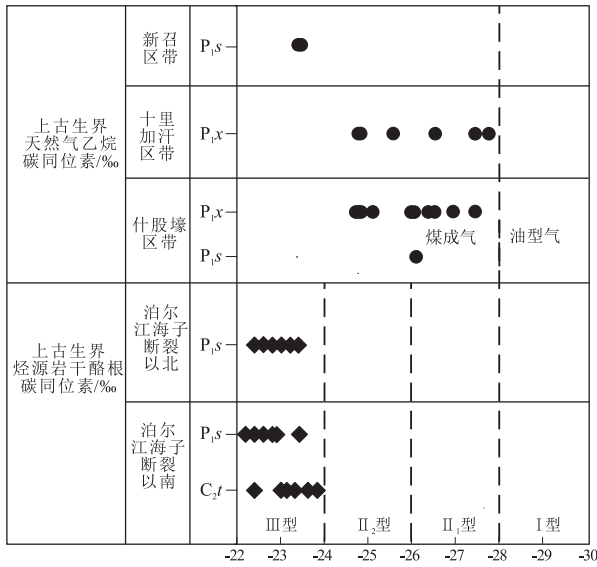


图7 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界天然气乙烷碳同位素与上古生界烃源岩干酪根同位素关系

Fig.7 Correlation of  $\delta^{13}C_2$  for natural gas with kerogen of source rocks from the Upper Paleozoic in Hangjinqi area, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界煤成气来自太原组—山西组腐殖型烃源岩<sup>[12-13]</sup>,但对于泊尔江海子断裂北侧什股壕区带上古生界天然气的来源存在分歧,是原地烃源岩所生,还是异地烃源岩所生经运移而来<sup>[7,9]</sup>?

成熟度匹配关系分析是气源对比的有效手段,天然气甲烷碳同位素值与 $R_o$ 值具有较好的线性关系,已建立了针对不同成因类型、不同演化模式的经验换算公式<sup>[24-25]</sup>。本文结合杭锦旗地区埋藏史—生烃史研究成果<sup>[15]</sup>,选用戴金星等<sup>[24]</sup>建立的煤成气 $\delta^{13}C_1-R_o$ 经验公式。计算结果表明,断裂以南十里加汗和新召区带上古生界天然气 $R_o$ 值分别介于0.74%~1.38%和1.25%~1.55%,平均值分别为1.10%和1.40%,与断裂以南太原组—山西组烃源岩成熟度 $R_o$ 值普遍高于1.30%<sup>[15]</sup>相吻合,表明十里加汗、新召区带煤成气主要来自原地的太原组—山西组烃源岩;而什股壕区带上古生界天然气 $R_o$ 介于1.14%~1.55%,平均值高达1.39%,明显与原地山西组烃源岩 $R_o$ 值普遍低于1.10%<sup>[15]</sup>不匹配,这也揭示原地的山西组烃源岩并非是该区上古生界天然气的主要贡献者,推测其主要来自断裂以南太原组—山西组高成熟煤系烃源岩。

综合上述分析,什股壕区带上古生界天然气主要由泊尔江海子断裂以南运移而来。在运移过程中地球化学特征会发生变化,如低碳数的甲烷气体优先扩散,而残留的天然气中甲烷含量降低的同时,碳同位素值增大,但实际情况却与此相悖,如何

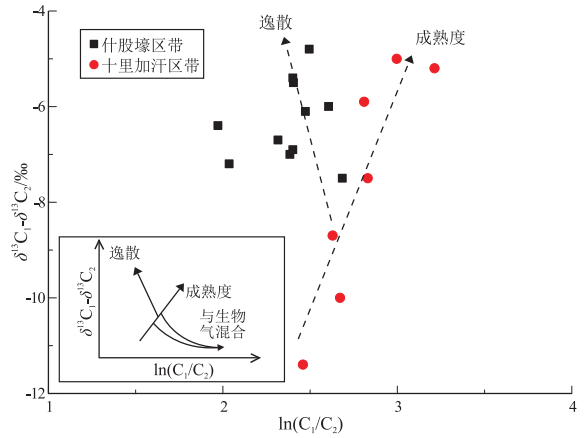


图8 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界天然气( $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2$ )- $\ln(C_1/C_2)$ 关系  
底图据参考文献<sup>[26]</sup>。

Fig.8 Correlation of  $(\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2)$  with  $\ln(C_1/C_2)$  for natural gas from the Upper Paleozoic in Hangjinqi area, Ordos Basin

解释这一“矛盾”现象? PRINZHOFER等<sup>[26]</sup>研究认为,甲、乙烷碳同位素差值与甲、乙烷含量比值同步增大,反映成熟度趋势;而在天然气逸散过程中,散失作用导致残留气藏天然气中甲烷含量降低的同时,碳同位素值增大,因而甲、乙烷含量比值减小,甲、乙烷碳同位素差值增大(图8)。因此,什股壕区带上古生界煤成气受到了明显的逸散作用,而十里加汗区带天然气表现出成熟度趋势(图8)。什股壕区带所处的伊盟隆起位于鄂尔多斯盆地边缘,受后期构造抬升影响,由泊尔江海子断裂以南运移聚集而成的天然气藏受到一定程度的改造与破坏,天然气发生了逸散,杭锦旗北部的乌兰格地区天然气逸散至地表,凝析形成白垩系油苗即为有力佐证<sup>[27]</sup>。

泊尔江海子断裂北侧什股壕区带生气强度仅为 $(0\sim 10)\times 10^8\text{m}^3/\text{km}^2$ <sup>[15]</sup>,生气能力较弱,故仅依靠原地山西组烃源岩的主要贡献,难以匹配目前的资源规模,如该区地质储量已超 $7\ 000\times 10^8\text{m}^3$ ,进一步佐证了什股壕区带上古生界天然气可能主要来自泊尔江海子断裂以南十里加汗等地区的上古生界煤系烃源岩。

## 5 结论

(1)鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界天然气以烃类气体为主,干燥系数介于0.802~0.948,主体属于湿气;天然气 $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 和 $\delta^{13}C_3$ 值分别介于-36.2‰~-31.7‰, -27.8‰~-23.3‰, -26.4‰~-19.5‰,  $\delta D_{CH_4}$ 值为-199‰~-172‰,烷烃气碳、氢同位素整体表现为正序特征。天然气折

算  $R_o$  值介于 0.74% ~ 1.55%, 处于成熟—高成熟演化阶段。

(2) 杭锦旗地区上古生界天然气为煤成气, 来自上古生界海陆过渡相煤系烃源岩, 但泊尔江海子断裂两侧上古生界天然气来源存在差异性, 南侧十里加汗区带天然气来自原地的太原组—山西组高成熟烃源岩, 而北侧什股壕区带天然气主要由断裂以南十里加汗等地区运移而来, 且后期遭受一定程度的破坏而发生逸散。

(3) 泊尔江海子断裂北侧上古生界天然气主体来自断裂以南, 且因其处于盆地边缘伊盟隆起区, 后期保存条件受到影响而发生逸散。考虑到鄂尔多斯盆地上古生界天然气总体具有近源成藏的显著特点, 结合泊尔江海子断裂两侧烃源条件及保存条件, 建议杭锦旗地区上古生界天然气下步勘探重点为断裂南侧的十里加汗区带。

致谢: 样品采集与分析测试得到了中国石化华北油气分公司和中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心的大力协助与支持, 在此深表谢意!

#### 参考文献:

- [1] 赵林, 夏新宇, 戴金星, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气富集的主要控制因素[J]. 石油实验地质, 2000, 22(2): 136-139.  
ZHAO Lin, XIA Xinyu, DAI Jinxing, et al. Major factors controlling the enrichment of the Upper Paleozoic natural gas in the Ordos Basin [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 2000, 22(2): 136-139.
- [2] 戴金星, 倪云燕, 吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 257-264.  
DAI Jinxing, NI Yunyan, WU Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(3): 257-264.
- [3] 方国庆, 刘德良. 鄂尔多斯盆地中部东西向天然气聚集区带研究[J]. 石油实验地质, 2000, 22(2): 146-151.  
FANG Guoqing, LIU Deliang. Study of the west-east trend natural gas accumulation zone in the middle of the Ordos Basin, China [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 2000, 22(2): 146-151.
- [4] 高先志, 廖鲁海, 王立武. 鄂尔多斯盆地中东部地区上古生界天然气储藏系统形成特征[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(6): 4-7.  
GAO Xianzhi, LIAO Luhai, WANG Liwu. Gas occurrence of upper Paleozoic petroleum system in middle eastern Ordos Basin [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1997, 21(6): 4-7.
- [5] 孟军田, 贾会冲. 鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区上古生界天然气地质特征与勘探前景[J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 708-711.  
MENG Juntian, JIA Huichong. The geological properties of natural gas and exploration prospects of Upper Paleozoic in Tabamiao area,

- north Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(6): 708-711.
- [6] 李贤庆, 冯松宝, 李剑, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格大气田天然气成藏地球化学研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 836-846.  
LI Xianqing, FENG Songbao, LI Jian, et al. Geochemistry of natural gas accumulation in Sulige Large Gas Field in Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 836-846.
- [7] 陈敬轶, 贾会冲, 李永杰, 等. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起上古生界天然气成因及气源[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 205-209.  
CHEN Jingyi, JIA Huichong, LI Yongjie, et al. Origin and source of natural gas in the Upper Paleozoic of the Yimeng Uplift, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(2): 205-209.
- [8] 薛会, 张金川, 王毅, 等. 鄂北杭锦旗探区构造演化与油气关系[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(2): 206-214.  
XUE Hui, ZHANG Jinchuan, WANG Yi, et al. Relationship between tectonic evolution and hydrocarbon in Hangjinqi Block of north Ordos Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(2): 206-214.
- [9] 纪文明, 李淮莲, 刘震, 等. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区上古生界气源岩分析[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 905-914.  
JI Wenming, LI Weilian, LIU Zhen, et al. Research on the Upper Paleozoic gas source of the Hangjinqi block in the northern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5): 905-914.
- [10] 李淮莲, 纪文明, 刘震, 等. 鄂尔多斯盆地北部泊尔江海子断裂对上古生界天然气成藏的控制[J]. 现代地质, 2015, 29(3): 584-590.  
LI Weilian, JI Wenming, LIU Zhen, et al. Control of Boerjiang-haizi fault on gas accumulation of Upper Paleozoic in northern Ordos Basin [J]. *Geoscience*, 2015, 29(3): 584-590.
- [11] 薛会, 王毅, 徐波. 鄂尔多斯盆地杭锦旗探区上古生界天然气成藏机理[J]. 石油实验地质, 2009, 31(6): 551-556.  
XUE Hui, WANG Yi, XU Bo. Accumulation mechanism of natural gas in Upper Paleozoic, Hangjinqi Block, North Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(6): 551-556.
- [12] 李良, 袁志祥, 惠宽洋, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 268-271.  
LI Liang, YUAN Zhixiang, HUI Kuanyang, et al. Accumulation regularity of Upper Paleozoic gas in north Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(3): 268-271.
- [13] 王明健, 何登发, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起上古生界天然气成藏条件[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(1): 30-39.  
WANG Mingjian, HE Dengfa, BAO Hongping, et al. Upper Palaeozoic gas accumulations of the Yimeng uplift, Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(1): 30-39.
- [14] 薛会, 张金川, 徐波, 等. 鄂尔多斯北部杭锦旗探区上古生界烃源岩评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 21-28.  
XUE Hui, ZHANG Jinchuan, XU Bo, et al. Evaluation of Upper Paleozoic source rocks of the Hangjinqi block in the northern Ordos Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2010, 37(1): 21-28.
- [15] 郝蜀民, 李良, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地北缘石炭系—二叠系

- 大型气田形成条件[J].石油与天然气地质,2016,37(2):149-154.
- HAO Shumin, LI Liang, ZHANG Wei, et al. Forming conditions of large-scale gas fields in Permo-Carboniferous in the northern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 149-154.
- [16] 吴小奇, 刘光祥, 刘全有, 等. 四川盆地元坝-通南巴地区须家河组天然气地球化学特征和成因[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 955-962.
- WU Xiaoqi, LIU Guangxiang, LIU Quanyou, et al. Geochemical characteristics and origin of natural gas in the Xujiahe Formation in Yuanba-Tongnanba area of Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 955-962.
- [17] XU Yongchang, SHEN Ping, TAO Mingxin, et al. Geochemistry on mantle-derived volatiles in natural gases from eastern China oil/gas province (II): Helium, argon and hydrocarbons in mantle volatiles[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1997, 40(3): 315-321.
- [18] 刘文汇, 孙明良, 徐永昌. 鄂尔多斯盆地天然气稀有气体同位素特征及气源示踪[J]. 科学通报, 2001, 46(22): 1902-1905.
- LIU Wenhui, SUN Mingliang, XU Yongchang. An approach to noble-gas isotopic compositions in natural gases and gas-source tracing in the Ordos Basin, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(6): 489-493.
- [19] DAI Jinxing, ZOU Caineng, ZHANG Shuichang, et al. Discrimination of abiogenic and biogenic alkane gases [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2008, 51(12): 1737-1749.
- [20] BERNARD B B, BROOKS J M, SACKETT W M. Natural gas seepage in the Gulf of Mexico [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, 31(1): 48-54.
- [21] SCHOELL M. The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(5): 649-661.
- [22] 王晓锋, 刘文汇, 徐永昌, 等. 不同成因天然气的氢同位素组成特征研究进展[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(2): 163-169.
- WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, XU Yongchang, et al. The hydrogen isotopic composition of natural gases generated from different pathway [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(2): 163-169.
- [23] LIU Quanyou, DAI Jinxing, LI Jian, et al. Hydrogen isotope composition of natural gases from the Tarim Basin and its indication of depositional environments of the source rocks [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(2): 300-311.
- [24] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学(卷一) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- DAI Jinxing, PEI Xigu, QI Houfa. Natural gas geology in China: Vol.1 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [25] STAHL W J. Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration [J]. Chemical Geology, 1977, 20: 121-149.
- [26] PRINZHOFER A A, HUC A Y. Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases [J]. Chemical Geology, 1995, 126(3/4): 281-290.
- [27] 刘友民. 陕甘宁盆地北缘乌兰格地区白垩系油苗成因及意义[J]. 石油勘探与开发, 1982(3): 39-43.
- LIU Youmin. The origin and significance of oil seepage from Cretaceous in Wulangeer area, north Shanganning Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1982(3): 39-43.

(编辑 徐文明)

(上接第192页)

- [17] 牟传龙, 周恩恩, 梁薇, 等. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 526-532.
- MU Chuanlong, ZHOU Kenken, LIANG Wei, et al. Early Paleozoic sedimentary environment of hydrocarbon source rocks in the Middle-Upper Yangtze region and petroleum and gas exploration [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 526-532.
- [18] 汪新伟, 沃玉进, 张荣强. 扬子克拉通南华纪—早古生代的构造—沉积旋回[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 523-533.
- WANG Xinwei, WO Yujin, ZHANG Rongqiang, et al. Tectonic-sedimentary cycle of the Yangtze Craton from Nanhuaan to the Early Palaeozoic [J]. Geoscience, 2008, 22(4): 523-533.
- [19] 靳雅夕, 蔡潇, 袁艺, 等. 渝东南地区志留系龙马溪组页岩粘土矿物特征及其地质意义[J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(2): 21-25.
- JIN Yaxi, CAI Xiao, YUAN Yi, et al. Clay mineral characteristics and geological significance in Silurian Longmaxi Formation shale, southeastern Chongqing [J]. Coal Geology of China, 2015, 27(2): 21-25.
- [20] 王淑芳, 邹才能, 董大忠, 等. 四川盆地富有机质泥岩硅质生物成因及对页岩气开发的意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 50(3): 476-486.
- WANG Shufang, ZOU Caineng, DONG Dazhong, et al. Biogenic silica of organic-rich shale in Sichuan Basin and its significance for shale gas [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 50(3): 476-486.
- [21] 程鹏, 肖贤明. 很高成熟度富有机质页岩的含气性问题[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 737-741.
- CHENG Peng, XIAO Xianming. Gas content of organic-rich shales with very high maturities [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 737-741.
- [22] 刘德汉, 史继扬. 高演化碳酸盐烃源岩非常规评价方法探讨[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(3): 113-115.
- LIU Dehan, SHI Jiyang. Discussion on unconventional evaluation methods about high evolution carbonate source rocks [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(3): 113-115.

(编辑 徐文明)