

文章编号: 1000-0550(2009)01-0172-00

济阳坳陷孤西断裂带深层天然气成因类型^①

王力¹ 金强² 刘永昌¹ 程付启³ 王政军¹ 吴远坤¹

(1. 冀东油田勘探开发研究院 河北唐山 063004 2 中国石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061;
3 胜利油田地质科学研究所 山东东营 257015)

摘要 针对孤西断裂带深层天然气来源多、成因复杂的问题,以烃源岩特征分析为基础,利用天然气三元地球化学示踪体系,还考虑了伴生油生物标志物特征等,并结合成藏地质条件的分析,深入剖析了该区天然气的地球化学特征和成因类型。认为孤西断裂带深层天然气呈规律性变化,自西往东由油型气逐渐过渡到煤成气;其中渤深 6 潜山天然气由源自渤南洼陷 E_5^+ 高熟油型气和 E_5^- 油型伴生气混合而成;渤古 4 潜山以 E_5^+ 生成的高成熟油型气为主,混有源自 C-P 的煤成气;孤北潜山第二排山天然气由煤成气和油型气混合而成;第三和第四排山则主要为 C-P 来源的煤成气。

关键词 深层天然气 成因类型 三元地球化学示踪体系 孤西断裂带 济阳坳陷

第一作者简介 王力 男 1982 年出生 博士 地质资源与地质工程 E-mail wangli19820723@163.com

中图分类号 TE122.3 **文献标识码** A

随着中浅层天然气储量的不断探明,深层天然气勘探成为了胜利油田实现“天然气大发展”的关键问题之一。所谓“深层”有两个涵义:一是勘探目的层埋深大于 3 500 m 二是指沙四段及其以下层位^②。近年来,渤深 6、渤古 4 潜山高产油气藏的发现和孤北古 1 井等工业气流的钻探成功,使得孤西断裂带成为了济阳坳陷深层天然气最为富集的地区之一^[1-3]。许多学者对该区天然气的成因进行了研究,但由于单一或少数指标的局限性和多解性,给出了不同观点^[4-6]:有人提出该区主要为煤成气;也有人认为除煤成气外,还发育高熟一过熟油型气;还有人指出研究区存在不同类型天然气的混合,至今尚未达成共识。

近期,刘文汇等在前人对天然气地球化学研究的基础上,提出了“天然气三元地球化学示踪体系”,即依据母质继承效应、热力学分馏效应和放射性年代积累效应等原理,综合运用稳定同位素、稀有气体同位素和轻烃化合物来反演天然气的形成—成藏过程^[7]。三者相互印证、集成互补,能够最大限度地反映天然气的母质类型、热演化程度等。本文在天然气三元示踪的基础上,考虑了伴生油的生标组成,并与成藏地质特征相结合,系统研究了孤西断裂带深层天然气的成因和来源,获取了与前人不同的认识,为该区乃至胜利油区深层天然气勘探部署提供了依据。

1 地质概况与烃源岩特征

孤西断裂带是指北西向孤西断层活动所形成的块断型潜山构造带,位于济阳坳陷沾化凹陷中部,北以埕南断层与埕东凸起相接,南以孤北断层与孤岛凸起相隔,西以孤西断层与渤南洼陷连通,往东逐渐倾没于孤北洼陷。主要包括渤深 6、渤古 4 下古生界潜山和孤北上古生界潜山等含气构造(图 1),其中孤北潜山又被北西向和南北向两组断层分割为第一排山、第二排山、第三排山和第四排山 4 个部分(图 1B)。

孤西断裂带及其临区主要发育了三套烃源岩:孤北 C-P 渤南洼陷 E_5^+ 和 E_5^- 。其中,孤北 C-P 是一套煤系沉积,发育黑色煤、炭质泥岩和深灰、灰黑色泥岩,具极高 Pr/Ph 值和低伽马蜡烷含量(表 1)。有机质含量丰富,以 II 型母质为主,达到了成熟—高成熟阶段,是煤成气的供给者。

渤南洼陷 E_5^+ 为典型的咸水湖相沉积,发育含膏泥页岩,具有低 Pr/Ph 值、重排烷丰度和高 C_{21-22} 烷、伽马蜡烷含量的特征。烃源岩有机质丰度高,TOC 分布于 1.0%~2.0%;有机质类型好,主要为 I 型和 II₁ 型;热演化程度高,主要处于高成熟阶段,是深层油型气的重要来源。

渤南洼陷 E_5^- 则属于淡水湖沉积,发育灰色—

① 国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2001CB209102);国家自然科学基金项目(批准号: 40572084)联合资助。

② 尹长河. 济阳坳陷深层油气藏地球化学研究, 2003

收稿日期: 2008-01-22 收修改稿日期: 2008-05-20

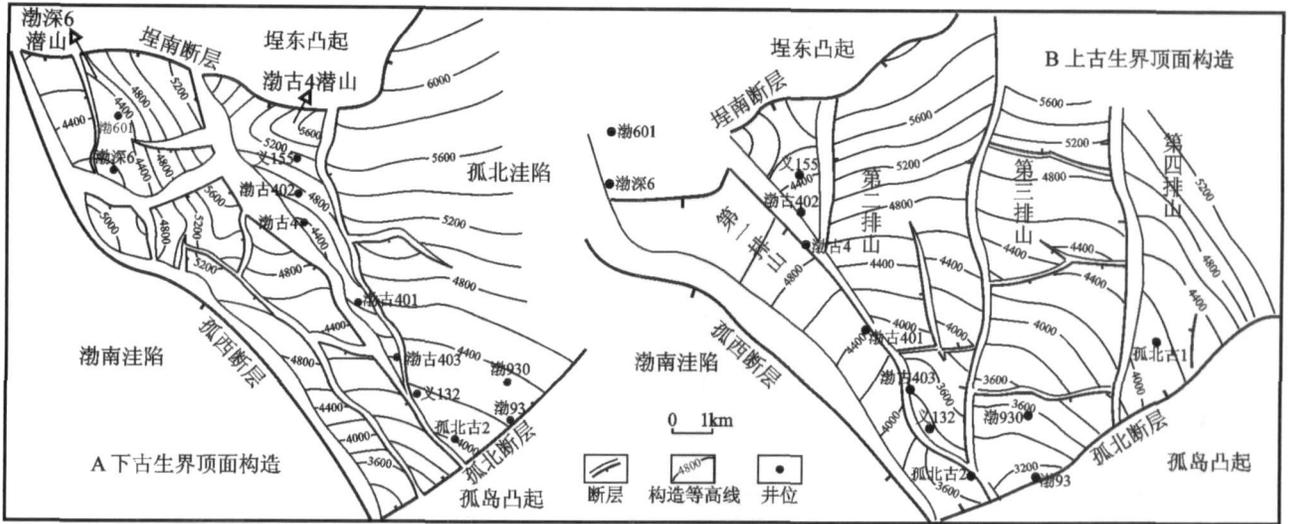


图 1 孤西断裂带构造位置图

Fig 1 Tectonic location of Guxi fault zone

表 1 孤西断裂带烃源岩地质地球化学特征

Table 1 Geochemical characteristics of source rocks in Guxi fault zone

区带	层位	岩性	TOC/%	有机质类型	R _o /%	Pr/Ph	C ₂₁₋₂₂ 甾烷	重排甾烷	γ/C ₃₀ 藿烷
孤北地区	C-P	煤	42.2~67.1						
		炭质泥岩	1.44~8.15	III型为主	0.94~1.77	1.67~2.34	较低	较低	0.07~0.16
		泥岩	0.72~4.18						
渤南洼陷	E ₃ ^上	含膏泥岩泥岩	1.0~2.0	I~II ₁ 型	1.26~1.56	<0.65	丰富	低	0.2~0.8
	E ₃ ^下	泥岩油页岩	1.9~3.0	I~II ₁ 型	0.71~1.12	0.6~1.3	低	丰富	<0.2

深灰色泥岩和油页岩, Pr/Ph值高, 重排甾烷含量丰富, C₂₁₋₂₂甾烷、伽马蜡烷含量较低。有机质含量高, TOC=1.9%~3.0%; 母质类型好, 以 I 和 II₁ 型为主; 位于成熟阶段, R_o=0.71%~1.12%, 主要生成油型伴生气。

2 天然气地球化学特征与成因类型

2.1 组分特征

孤西断裂带深层天然气组成中烃类气体占绝对

优势, 含量均大于 90%; 非烃气体以 CO₂和 N₂为主, 平均含量分别为 4.39%和 0.8% (表 2)。烃类组分中, 渤深 6 潜山天然气以富含重烃 (C₂⁺) 为特征, 含量达 17.27%~19.67%, 干燥系数 (C₁/C₁₋₅) 为 0.79~0.82; 渤古 4 潜山次之, 甲烷和重烃含量分别介于 78.98%~81.96%和 10.18%~12.83%; 孤北潜山上古生界天然气整体偏干, 第三、四排山以及义 155 井天然气甲烷含量均大于 86%, 干燥系数大于 0.92; 第二排山孤北古 2 和义 132 井则不同, 甲烷含量小于

表 2 孤西断裂带深层天然气组分特征

Table 2 The composition of deep natural gas in Guxi fault zone

区块	井号	层位	深度/m	C ₁ /%	C ₂ ⁺ /%	CO ₂ /%	N ₂ /%	C ₁ /C ₁₋₅
渤深 6 潜山	渤 601	O	4733~4862	76.2	17.27	5.05	1.22	0.82
	渤深 6	O	4165~4262	74.98	18.84	4.77	0.51	0.8
	渤深 6-5	O	4391~5118	71.83	19.67	6.66	0.98	0.79
渤古 4 潜山	渤古 4	O	4375~4460	81.96	10.18	7.39	0.44	0.89
	渤古 403	O	3806~3966	78.98	12.83	6.86	0.88	0.86
孤北潜山	孤北古 2	C-P	3689~3731	75.87	19.48	3.65	0.96	0.8
	第二排山 义 132	C-P	3374~3387	82.1	14.21	1.87	0.98	0.85
	义 155	C-P	4528~4574	87.64	4.85	6.64	0.86	0.95
	第三排山 渤 93	C-P	3120~3136	92.1	5.88	1.47	0.55	0.94
	渤 930	C-P	3546~3650	92.88	5.76	0	1.26	0.94
	第四排山 孤北古 1	C-P	4020~4139	86.67	7.35	4.54	0.55	0.92

表 3 孤西断裂带深层天然气碳同位素特征

Table 3 The carbon isotope of deep natural gas in Guxi fault zone

区块	井号	层位	深度 /m	$\delta^{13}C_1$ ‰	$\delta^{13}C_2$ ‰	$\delta^{13}C_3$ ‰	$\delta^{13}C_4$ ‰	天然气 R_o /%					
								①	②	③	④	⑤	⑥
渤深 6 潜山	渤 601	O	4733~4862	-43.8	-28.7	-25.8	-26.1	0.22	0.43	0.63	0.51	0.79	0.95
	渤深 6	O	4165~4262	-40.8	-27.6	-24.5	-24.8	0.35	0.59	0.72	0.67	1.23	1.30
	渤深 6-5	O	4391~5118	-41.5	-28.2	-25.2	-25.0	0.31	0.50	0.70	0.60	1.11	1.21
渤古 4 潜山	渤古 4	O	4375~4460	-38.2	-24.9	-22.5	-23.6	0.54	1.26	0.82	1.33	1.79	1.72
	渤古 403	O	3806~3966	-37.0	-23.8	-22.1	-23.8	0.65	1.71	0.87	1.75	2.13	1.95
孤北潜山	孤北古 2	C-P	3689~3731	-41.0	-25.8	-23.6	-23.6	0.34	0.97	0.72	1.06	1.19	1.28
	义 132	C-P	3374~3387	-38.0	-25.4	-25.0	-25.5	0.56	1.09	0.83	1.17	1.84	1.76
	义 155	C-P	4528~4574	-32.2	-22.0	-21.5	-20.9	1.43	2.84	1.31	2.76	4.29	3.25
	渤 93	C-P	3120~3136	-37.1	-19.1	-17.1	-18.8	0.64	6.46	0.87	5.72	2.10	1.93
	渤 930	C-P	3546~3650	-35.5	-16.8	-16.1	-15.4	0.83	12.3	0.93	10.2	2.65	2.29
	孤北古 1	C-P	4020~4139	-35.9	-23.1	-21.2	-21.2	0.78	2.09	0.90	2.09	2.50	2.19

注: ①戴金星煤成气 $\delta^{13}C_1 = 14.12 \pm 0.39 \text{‰}$; ②戴金星煤成气 $\delta^{13}C_2 = 8.16 \pm 0.71 \text{‰}$; ③刘文汇煤成气 $\delta^{13}C_1 = 48.77 \text{‰}$ ($R_o < 0.8\% \sim 1.0\%$) 和 $\delta^{13}C_1 = 22.42 \text{‰}$ ($R_o > 0.8\%$); ④刘文汇煤成气 $\delta^{13}C_2 = 9.149 \text{‰}$; ⑤戴金星油型气 $\delta^{13}C_1 = 15.8 \text{‰}$; ⑥沈平油型气 $\delta^{13}C_1 = 21.72 \text{‰}$ 。

83%, 干燥系数低于 0.85。

2.2 碳同位素特征

天然气中甲烷及其同系物的碳同位素组成主要受母质继承效应和热动力学分馏效应的影响, 能够有效反映成气母质类型及其热演化程度, 是划分天然气成因类型的重要依据^[8-12]。孤西断裂带天然气碳同位素组成中, 渤深 6 潜山最轻, $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_2$ 主要分布于 $-43.8\text{‰} \sim -40.8\text{‰}$ 和 $-28.7\text{‰} \sim -27.6\text{‰}$; 渤古 4 潜山次之, 分别为 $-38.2\text{‰} \sim -37.0\text{‰}$ 和 $-24.9\text{‰} \sim -23.8\text{‰}$; 孤北潜山第三、四排山以及义 155 井较重, $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_2$ 介于 $-37.1\text{‰} \sim -32.2\text{‰}$ 和 $-23.1\text{‰} \sim -16.8\text{‰}$; 而第二排山孤北古 2 和义 132 井则明显要轻, 分别为 $-41\text{‰} \sim -38\text{‰}$ 和 $-25.8\text{‰} \sim -25.4\text{‰}$ (表 3)。

乙烷碳同位素由于受母质继承效应明显, 受热演化影响较小, 因此常将其作为油型气和煤成气的分界标志 ($\delta^{13}C_2 = -29\text{‰}$ 或 -28‰)^[12]。按照这一标准, 孤西断裂带深层天然气应均为煤成气。这样, 就可以利用天然气 $\delta^{13}C$ 与 R_o 的关系来估算其成熟度, 结合研究区地质背景, 主要采用了戴金星^[13] 和刘文汇等^[14] 建立的煤成气模型, 计算结果见表 3。按照 $\delta^{13}C_1$ 估算 (①和③), 渤深 6 潜山天然气 R_o 为 $0.22\% \sim 0.72\%$, 这与 C-P 源岩成熟度 ($R_o = 0.94\% \sim 1.77\%$) 明显不符; 渤古 4 潜山为 $0.54\% \sim 0.87\%$, 第二排山孤北古 2 和义 132 井介于 $0.34\% \sim 0.83\%$, 均与煤系源岩存在差异; 第三、四排山以及义 155 井天然气 R_o 主要分布于 $0.83\% \sim 1.43\%$, 与 C-P 源岩演

化程度基本吻合, 表明研究区并非全为煤成气。此外, 除渤深 6 潜山外该区天然气据 $\delta^{13}C_2$ 计算的成熟度 (②和④) 与 $\delta^{13}C_1$ 差异巨大, 一方面可能是受公式适用范围的影响, 另一方面更主要是由于研究区天然气 $\delta^{13}C_2$ 异常。与国内外典型煤成气^[15] 相比, 该区天然气 $\delta^{13}C_2$ 明显偏重 (图 2), 例如渤 930 井 $\delta^{13}C_1$ 与莺琼盆地东方 1-1 气田天然气相当, $\delta^{13}C_2$ 却比其重 $8\text{‰} \sim 9\text{‰}$; 这可能是由于研究区岩浆和深部热流体活动强烈, 而重烃同位素在高温、高演化阶段下迅速增重所致^[16]。因此不能仅凭 $\delta^{13}C_2$ 来判识研究区深层天然气成因。

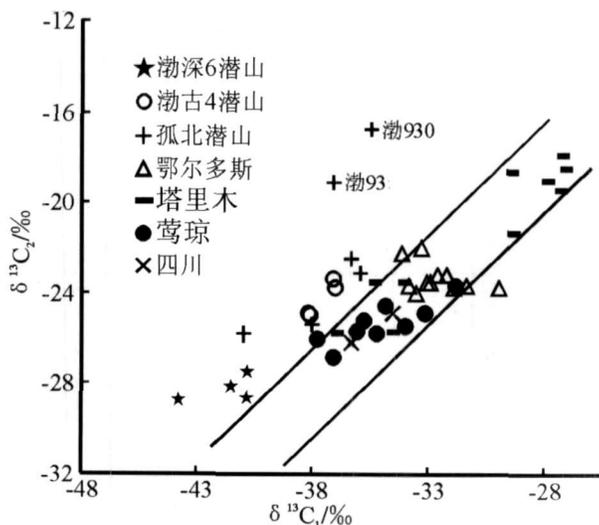


图 2 孤西断裂带天然气 $\delta^{13}C_1$ 与 $\delta^{13}C_2$ 关系
Fig 2 Relationship between $\delta^{13}C_1$ and $\delta^{13}C_2$ of natural gas in Guxi fault zone

针对上述问题, 综合运用 $\delta^{13}C_1$ 和 $\Delta\delta^{13}C_{2-1}$ 二者来探讨研究区天然气成因^[17, 18] (图 3); 渤深 6 潜山天然气位于油型高熟气和伴生气交界处, 这与其据油型气模型估算所得 R_0 (表 3⑤和⑥) 介于渤南洼陷 Es^+ 和 Es^- 烃源岩之间相吻合; 渤古 4 潜山介于油型高熟气和煤成气之间, 其据煤成气和油型气 $\delta^{13}C_1$ 与 R_0 关系计算成熟度又分别低于 C-P 源岩、高于 Es^+ , 且碳同位素序列发生了局部倒转^[10], 这很有可能是由二者的混合所造成; 孤北上古生界潜山第三、四排山以及义 155 井主要为煤成气, 其 R_0 与 C-P 煤系一致, 而与油型气源岩明显不符; 第二排山义 132 和孤北古 2 井则不同, 存在油型气的混入, 其估算 R_0 值介于煤系源岩和油型气源岩之间, 表明由煤成气和油型气混合而成。

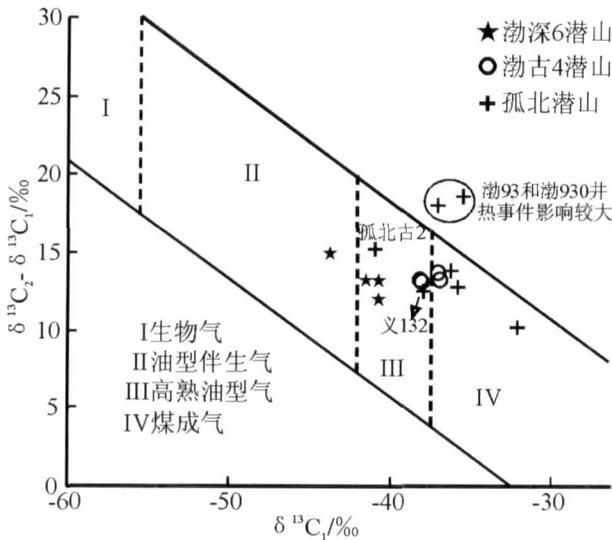


图 3 孤西断裂带天然气 $\delta^{13}C_1$ 与 $\Delta\delta^{13}C_{2-1}$ 关系
Fig 2 Relationship between $\delta^{13}C_1$ and $\Delta\delta^{13}C_{2-1}$ of natural gas in Guxi fault zone

2.3 稀有气体同位素

稀有气体虽然在天然气中属于微量组分, 但是由于其特有的成因和化学上的惰性, 在判识天然气成因类型、来源及气源岩地质年代学研究中发挥了重要作用^[11]。渤深 6 井和孤北古 1 井高压天然气样品及其

稀有气体同位素特征如表 4 $^4He/^{20}Ne$ 值为 751 ~ 772 远大于空气值 (0.318), 表明样品可靠 (无空气混入), 分析结果可信。

稀有气体中的氦 (He) 具有大气来源、壳源和幔源三种成因。大气氦的 $^3He/^4He$ 值为 1.4×10^{-6} , 幔源氦 $^3He/^4He$ 通常取 1.1×10^{-5} 作为表征值, 典型壳源氦 $^3He/^4He$ 值为 $n \times 10^{-8}$, 平均为 $(2 \sim 3) \times 10^{-8}$ ^[14, 19]。渤深 6 井与孤北古 1 井天然气 $^3He/^4He$ 值分别为 6.65×10^{-8} 和 7.84×10^{-8} , R/Ra 值为 0.05 和 0.056 均表现出壳源特征。而地壳成因天然气 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 值具有年代积累效应, 因此可利用二者的关系估算气源岩的年龄。徐永昌和刘文汇等^[20, 21] 通过对我国含油气盆地天然气氩同位素组成特征的综合研究, 分别回归出了 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 值与气源岩时代的关系式 (式 1 和 2)。

$$T = 530 \lg(^{40}Ar/^{36}Ar) - 1323 \quad n = 158 \quad (式 1)$$

$$T = 544.5 \lg(^{40}Ar/^{36}Ar) - 1362 \quad n = 69 \quad (式 2)$$

式中: T 为气源岩年龄, 单位 Ma; n 为数据个数。

利用上述公式对研究区天然气的源岩时代进行了估算, 结果表明: 孤北古 1 井天然气主要由上古生界气源岩供给, 与其煤系来源相吻合; 渤深 6 井天然气 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 值明显低于孤北古 1 井, 主要源自古近系气源岩, 进一步证实其为油型气, 而非煤成气。

2.4 轻烃组成

天然气中不同程度地都含有一定量的轻烃 ($C_5 \sim C_8$), 它们的形成和演化与天然气息息相关, 而且异构体非常丰富, 蕴涵的地化信息远大于气态烃类, 因此国内外许多学者在进行天然气成因判识、气源对比等研究时, 常利用轻烃展开综合分析, 并取得了令人满意的效果^[10, 22~25]。

C_7 轻烃系统可有效划分天然气的母质类型: 其中甲基环己烷 (MCC_6) 主要来自高等植物, 是煤成气中轻烃的特点; 正庚烷 (nC_7) 和二甲环戊烷 ($DMCC_5$) 分别来源于藻类、细菌和水生生物, 是油型气中轻烃的特征^[24]。渤深 6 潜山天然气具有高 nC_7 含量 (43% ~ 46%) 和低 MCC_6 含量 (32% ~ 35%) 的特征。

表 4 孤西断裂带天然气稀有气体同位素组成

Table 4 Rare gas isotope of natural gas in Guxi fault zone

井号	层位	深度 /m	采样容器	油压 /MPa	套压 /MPa	$^3He/^4He/10^{-8}$	R/Ra	$^{40}Ar/^{36}Ar$	$^4He/^{20}Ne$
渤深 6	O	4165 ~ 4262	高压钢瓶	14.5	16.0	6.65	0.05	446	772
孤北古 1	C-P	4020 ~ 4139	高压钢瓶	18.0	12.5	7.84	0.056	686	751

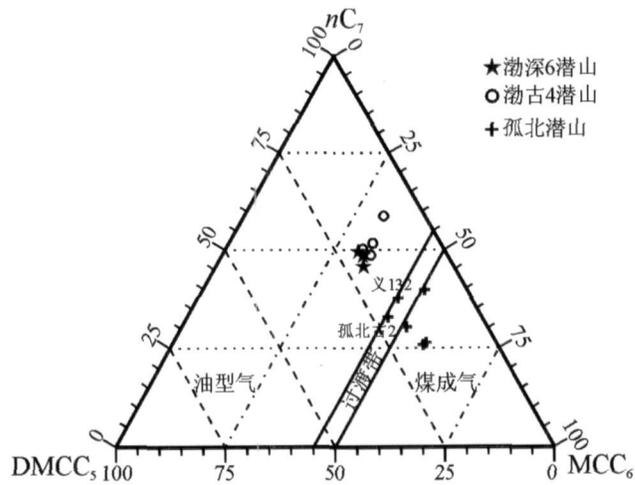


图 4 孤西断裂带深层天然气 C₇ 轻烃组成

Fig 4 Components of C₇ light hydrocarbon of deep natural gas in Guxi fault zone

属于油型气，与碳同位素和稀有气体同位素的判别结果一致；渤古 4 潜山天然气也以 nC₇ (45% ~ 48%) 为主、MCC₆ 含量较低 (34% ~ 35%)，结合碳同位素特征，认为其以油型气为主，混入了部分煤成气；孤北潜山第二排山孤北古 2 和义 132 井落入了过渡带，进一步证实了其混合成因；第三、四排山以及义 155 井天然气 MCC₆ 含量基本都在 50% 以上，主要位于煤成气区，也与前述指标的认识相吻合。

2.5 伴生油特征

孤西断裂带深层不仅富集天然气，也有伴生油产出。由于二者往往具有密切的亲缘关系，因此对伴生油特征展开分析将有助于天然气成因类型的判别。

孤北古 1 井伴生油姥鲛烷优势异常明显 (Pr/Ph 值 = 2.34)，为典型的煤系特征。甾烷系列具有低孕甾烷、升孕甾烷和重排甾烷含量的特征，与孤北 C—P 煤系源岩特征相近 (表 1)。由此看来，该原油主要为煤系来源，与天然气的成因一致。

渤古 4 井轻质油 Pr/Ph 值 = 1.41。孕甾烷、升孕甾烷含量丰富，重排甾烷含量较低，与渤南洼陷 Es[±] 烃源岩相似。C₂₉ 甾烷 αα 20S / (20S + 20R) 值和 C₂₉ 甾烷 ββ / (ββ + αα) 值分别为 0.49 ~ 0.51 和 0.56 ~ 0.6 达到了热演化的平衡点，表明为高成熟原油。伽马蜡烷 / C₃₀ 藿烷值为 0.07，可能混有煤系贡献。总之，该轻质油既表现出盐湖相原油特征，也具有煤系来源的特点，与天然气的混合成因相吻合。

渤深 6 井轻质油姥鲛烷优势 (Pr/Ph 值 = 1.19) 不及渤古 4 井。低碳数甾烷和重排甾烷均十分发育；伽马蜡烷含量 (伽马蜡烷 / C₃₀ 藿烷值 = 0.11) 比渤古 4 井要高。整体上看，该轻质油同时具有 Es[±] 咸水湖相和 Es^下 淡水湖相的特征，应由二者混合而成，这也进一步证实了天然气的混合成因。

综上所述，发现孤西断裂带深层天然气地球化学特征整体上呈规律性变化：由西向东，即沿着渤深 6 潜山—渤古 4 潜山—第二排山—第三、四排山方向，天然气组分逐渐变干、碳同位素逐渐增重、⁴⁰Ar/³⁶Ar 值逐渐增大、MCC₆ 相对含量逐渐变高，天然气也由油型气过渡到煤成气。其中，渤深 6 潜山发育渤南洼陷 Es_上 高熟油型气和 Es_下 油型伴生气的混合气；渤古 4 潜山以源自 Es[±] 的高熟油型气为主，还存在 C—P 煤系的贡献；孤北潜山第二排山天然气由煤成气和油型气混合而成；第三、四排山以及义 155 井主要为 C—P 来源煤成气。

3 地质特征分析

煤系烃源岩以生气为主、生油为辅，而腐泥型烃源岩则同时具有较高的生油和生气潜力^[11]。渤深 6 和渤古 4 潜山同时具有较高的天然气和原油产量；孤北潜山第三、四排山以及义 155 井具有较高的天然气产量，但产油量极少或不产油 (表 5)，这与它们分别

表 5 孤西断裂带古生界试油结果

Table 5 The oil test of Palaeozoic in Guxi fault zone

区块	井号	层位	深度 / m	油嘴 / mm	天然气 / (10 ⁴ m ³ /d)	原油 (t/d)	
渤深 6 潜山	渤 601	O	4733 ~ 4862	10	4.7	85.7	
	渤深 6	O	4165 ~ 4262	6	2.5	133	
	渤古 4	O	4375 ~ 4413	8	7.6	47.4	
渤古 4 潜山	渤古 403	O	3806 ~ 3966	10	0.5	18.1	
	孤北潜山	孤北古 2	C—P	3689 ~ 3731	5	0.3	0.2
第二排山		义 132	C—P	3374 ~ 3387	6	3.8	41.1
义 155		C—P	4528 ~ 4574	8	1.4	0	
第三排山		渤 93	C—P	3120 ~ 3136	10	0.9	0
渤 930	C—P	3617 ~ 3639	5	1.2	0		
第四排山	孤北古 1	C—P	4120 ~ 4139	6	11.1	0.002	

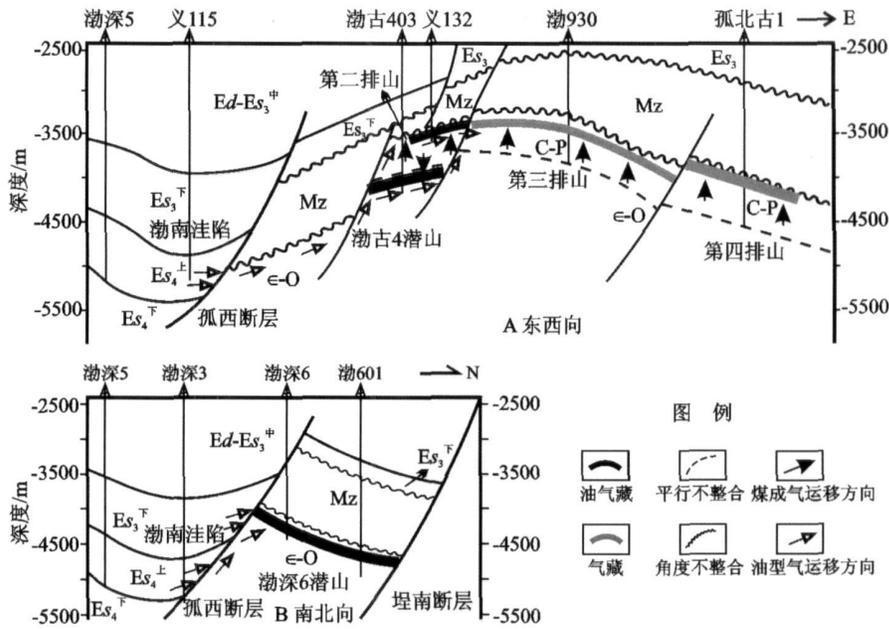


图 5 孤西断裂带深层油气成藏模式图

Fig 5 Deep hydrocarbon accumulation patterns of Guxi fault zone

以腐泥型和腐殖型来源为主相吻合。孤北古 2 和义 132 井由于混有渤南洼陷古近系的油气, 因而也同时具有较高的油气产量。

孤西断裂带天然气的成因与其成藏特征密切相关。该区经历了印支、燕山和喜山等多期构造运动, 形成了现今的构造格局, 也导致多期不整合的发育, 为油气长距离侧向运移提供了有利条件。地震资料揭示, 孤西断层早在印支期就开始活动, 至喜山中期—沙河街组沉积时期才停止活动^[2,3], 垂直断距达 500~1 500 m。渤南洼陷生成的油气很容易通过这些良好的通道运移至孤西断裂上升盘的古生界潜山带。其中, 渤古 4 潜山主要聚集了 Es_4^+ 生成的高熟油型气, 上覆的 C—P 煤系地层不仅可以起到良好的封盖作用, 还能提供煤成气, 从而导致了油型气与煤成气的混合 (图 5A); 渤深 6 潜山同时与渤南洼陷的两套烃源岩对接 (图 5B), 不仅能够捕集 Es_4^+ 来源的高熟油型气, 也可聚集 Es_3^+ 来源的油型伴生气, 两种天然气在圈闭中形成混合气藏, 该区缺失了 C—P 以 Mz 底部的泥岩段为盖层, 所以未混入煤成气。O 储层一方面由于风化淋滤形成了许多溶蚀裂缝和溶洞, 另一方面受断层影响, 构造裂缝十分发育, 极大地改善了储集物性, 有利于高产油气藏的形成。

此外, 源自渤南洼陷的油型气还可以继续沿断层和不整合面, 向上倾方向的孤北潜山第二排山运移, 并与 C—P 煤成气混合成藏 (图 5A) 义 155 井为岩

性气藏, 因而主要聚集了 C—P 的煤成气; 而第三、四排山由于距离孤北断层和渤南洼陷较远, 油型气难以大规模运移至此^[3], 因此其也主要为 C—P 来源的煤成气, 这与天然气成因分析的结果相一致。该区储集层虽然由于埋深大、压实作用强烈, 原生孔隙不发育, 但次生孔隙较为发育^[2], 提高了孔渗性; 上覆 Mz 底部含煤泥岩层和 P 顶部的泥岩层, 都是良好的盖层, 为天然气的聚集和保存提供了有利条件。

4 结论

(1) 研究区深层主要发育 3 套烃源岩: 孤北缓坡带 C—P 煤系烃源岩是煤成气的供给者, 渤南洼陷 Es_4^+ 咸水湖相烃源岩是油型气的主要来源, Es_3^+ 淡水湖相烃源岩仅对局部油气藏有一定贡献。

(2) 孤西断裂带深层天然气地球化学特征和成因类型呈规律性变化, 自西往东由油型气逐渐过渡到煤成气。其中, 渤深 6 潜山天然气由渤南洼陷 Es_4^+ 和 Es_3^+ 来源的油型气混合而成; 渤古 4 潜山天然气主要由 Es_4^+ 高成熟油型气构成, 混有煤系的贡献; 孤北潜山第二排山发育煤成气与油型气的混合气; 第三和第四排山主要为源自 C—P 煤成气。孤西断层和不整合面为天然气的运移提供了通道。

(3) 天然气三元地球化学示踪体系与成藏地质背景相结合的方法, 有效解决了孤西断裂带天然气成因复杂性和单一指标局限性、多解性的矛盾, 对于指

导研究区乃至胜利油田深层天然气勘探和资源潜力研究具有重要意义。

参考文献 (References)

- 胡宗全, 周新科, 张玉兰, 等. 济阳拗陷前第三系油气勘探前景 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 655-660 [Hu Zongquan, Zhou Xinke, Zhang Yulan, et al. Potential of petroleum exploration in pre-Tertiary in Jiyang Depression [J]. Oil and Gas Geology, 2005, 26(5): 655-660]
- 彭传圣. 济阳拗陷孤北低潜山煤成气成藏条件及特征 [J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(4): 670-676 [Peng Chuansheng. The pool-forming condition and character of coal-formed gas in Gubei deeply buried hill of Jiyang Depression [J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(4): 670-676]
- 李红梅. 孤北斜坡带煤成气成藏条件分析 [J]. 天然气工业, 2006, 26(2): 23-25 [Li Hongmei. Analysis of coal-derived gas reservoir conditions in Gubei slope zone [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(2): 23-25]
- 尹长河, 陈洁, 孙锡文, 等. 渤南洼陷孤西深洼带的煤成气 [J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(4): 42-44 [Yin Changhe, Chen Jie, Sun Xiwen, et al. Coal formed gas in Guxi deep land of Bonan subsag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002, 9(4): 42-44]
- 向奎, 樊庆真, 骆光华. 应用多元信息综合分析法进行气源追踪——以济阳拗陷深层气气源追踪为例 [J]. 石油实验地质, 1998, 20(3): 261-266 [Xiang Kui, Fan Qingzhen, Luo Guanghua. A comprehensive method of multiple information for tracing gas source: a case study of Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Experiment, 1998, 20(3): 261-266]
- 宋明水, 张学才. 济阳拗陷渤南洼陷深层天然气的地球化学特征及成因探讨 [J]. 天然气地球科学, 2004, 15(6): 646-649 [Song Mingshui, Zhang Xuecai. Discussion on deep gas geochemical characteristics and genesis of Bonan Sag Jiyang depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(6): 646-649]
- 刘文汇, 陈孟晋, 关平, 等. 天然气成藏过程的三元地球化学示踪体系 [J]. 中国科学 (D辑), 2007, 37(7): 908-915 [Liu Wenhui, Chen Mengjin, Guan Ping, et al. Ternary geochemical-tracing system in natural gas accumulation [J]. Science in China (Series D), 2007, 37(7): 908-915]
- Faber E, Stahler W. Gaseous hydrocarbons of unknown origin found while drilling [J]. Organic Geochemistry, 1987, 13(10): 875-879
- Berner U, Faber E. Empirical carbon isotope maturity relationships for gases from algal kerogens and terrigenous organic matter based on dry open-system pyrolysis [J]. Organic Geochemistry, 1996, 24(10): 947-955
- 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学 (卷 1) [C]. 北京: 石油工业出版社, 1992, 35-82 [Dai Jinxing, Pei Xigu, Qi Houfa. Natural Gas Geology in China (Vol. 1) [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992, 35-82]
- 徐永昌. 天然气成因理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1994, 68-222 [Xu Yongchang. Theory and Application of Natural Gas Genesis [M]. Beijing: Science Press, 1994, 68-222]
- 刘文汇, 张殿伟, 王晓锋, 等. 天然气气源对比的地球化学研究 [J]. 沉积学报, 2004, 22(增刊): 27-32 [Liu Wenhui, Zhang Dianwei, Wang Xiaofeng, et al. Geochemistry study on gas source correlation of natural gas [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(Suppl): 27-32]
- 戴金星, 宋岩. 鉴别煤成气的指标 [C] // 煤成气地质研究. 北京: 石油工业出版社, 1987, 156-170 [Dai Jinxing, Song Yan. The Index to Distinguish Coal-Genetic Gas [C] // The Geological Research of Coal-Genetic Gas. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987, 156-170]
- 刘文汇, 徐永昌. 煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理 [J]. 地球化学, 1999, 28(4): 359-366 [Liu Wenhui, Xu Yongchang. A two-stage model of carbon isotopic fractionation in coal-gas [J]. Geochimica, 1999, 28(4): 359-366]
- 戴金星, 陈践发, 钟宁宁, 等. 中国大气田及其气源 [M]. 北京: 科学出版社, 2003, 25-163 [Dai Jinxing, Chen Jianfa, Zhong Ningning, et al. Large Gas Fields of China and Their Gas Sources [M]. Beijing: Science Press, 2003, 25-163]
- Tilley B, Muehlenbachs K. Gas maturity and alteration systematics across the Western Canada Sedimentary Basin from four mud gas isotopic depth profiles [J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(12): 1857-1868
- 黄汝昌. 中国低熟油及凝析气藏形成与分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997, 24-32 [Huang Ruchang. Formation and Distribution of Immature Oil and Condensate Oil in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997, 24-32]
- 赵孟军, 卢双舫, 李剑. 库车油气系统天然气地球化学特征及气源探讨 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(6): 4-7 [Zhao Mengjun, Lu Shuangfang, Li Jian. The geochemical features of natural gas in Kuqa depression and the discussion on the gas source [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(6): 4-7]
- Lupton J. Terrestrial inert gases: Isotopic tracer studies and clues to primordial components in the mantle [J]. Annual Review Earth Planet Science, 1983, 11(5): 371-414
- 徐永昌. 天然气中的幔源稀有气体 [J]. 地学前沿, 1996, 3(3-4): 63-70 [Xu Yongchang. The mantle noble gas of natural gas [J]. Earth Science Frontiers, 1996, 3(3-4): 63-70]
- 刘文汇, 徐永昌. 天然气中氦、氩同位素组成的意义 [J]. 科学通报, 1993, 38(9): 818-821 [Liu Wenhui, Xu Yongchang. The significance of He and Ar isotopic composition in natural gas [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(9): 818-821]
- Leythaeuser D, Schaefer R, Cornford G, et al. Generation and migration of light hydrocarbon (C₂~C₇) in sedimentary basins [J]. Organic Geochemistry, 1979, 1(4): 191-214
- Snowdon L, Powell T. Immature oil and condensate modification of hydrocarbon generation model for terrestrial organic matter [J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(6): 775-788
- 胡惕麟, 戈葆雄, 张义纲, 等. 源岩吸附烃和天然气轻烃指纹参数的开发和应用 [J]. 石油实验地质, 1990, 12(4): 375-393 [Hu Tili, Ge Baoxiong, Zhang Yigang, et al. The development and appli-

cation of fingerprint parameters for hydrocarbons absorbed by source rocks and light hydrocarbons in natural gas[J]. *Petroleum Geology and Experiment* 1990 12(4): 375-393]

25 杨华, 张文正, 李剑锋, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气的

地球化学研究[J]. *沉积学报*, 2004 22(增刊): 39-44 [Yang Hua Zhang Wenzheng Li Jianfeng et al. Geochemical study of the upper Paleozoic gas in the northern Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2004 22(Suppl): 39-44]

Genetic Types of Deep Natural Gas in Guxi Fault Zone in Jiyang Depression

WANG Li¹ JIN Qiang² LIU Yongchang¹ CHENG Fuqi¹ WANG Zhengjun¹ WU Yuankun¹

(1. Exploration and Development Research Institute of Jidong Oil Field Tangshan Hebei 063004

2. Faculty of Geo Resources and Information in China University of Petroleum, Dongying Shandong 257064

3. Geological Scientific Research Institute of Shengli Oil Field Dongying Shandong 257015)

Abstract The deep natural gas in Guxi fault zone is of the characteristics such as multisource and complex genesis. In view of this problem, based on the analysis of source rocks characteristics, the ternary geochemical-tracing system of natural gas and biomarkers of associated oil were used in order to clarify the geochemical characteristics and genesis of natural gas in the area, combining with analysis on geologic condition of gas pools. It is proposed that the natural gas in Guxi fault zone shows certain regularities and shifts from oil-typed gas to coal-type gas from west to east. Gas in Boshen 6 buried hill is the mixture of high-matured oil-type gas from upper E₃ source rocks in Bonan subsag and oil-associated gas from lower E₃ source rocks. Natural gas from Bogu 4 buried hill mainly consists of high-matured oil-type gas sourced by upper E₃ source rocks, mixed with coal-typed gas. Gas in the second row of Gubei buried hill is the mixture of coal-type and oil-type gas, and natural gas from the third and fourth rows is mainly composed of coal-type gas generated by the upper Paleozoic source rocks.

Key words deep natural gas; genetic type; ternary geochemical-tracing system; Guxi fault zone; Jiyang Depression