

天然气地球化学

济阳坳陷孤北—渤南地区渤古4潜山 天然气地球化学特征及气源探讨

王力¹, 金强¹, 林腊梅¹, 尹长河², 宋国奇²

(1. 中国石油大学, 山东 东营 257061; 2. 胜利油田地质科学研究所, 山东 东营 257015)

摘要: 济阳坳陷孤北—渤南地区深层天然气来源多, 成因复杂, 混源现象普遍。针对这一问题, 运用天然气组分、稳定碳同位素、轻烃组成和伴生原油生物标志化合物等多种指标, 并与邻区天然气进行对比, 判识了该区渤古4潜山奥陶系天然气的地球化学特征和成因类型, 认为该区天然气主要为高成熟油型气, 混有部分煤成气。

依据天然气与气源岩地球化学特征并结合成藏地质条件, 明确了天然气的来源, 认为渤古4潜山天然气主要源自渤南洼陷 E_5^+ 气源岩, 混有孤北 C—P 煤成气, 伴生油具有相似的来源。

关键词: 天然气; 地球化学特征; 气源分析; 渤古4潜山; 沾化凹陷

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2007)05-0715-05

0 前言

渤古4潜山位于渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷中部, 北为埕东凸起, 南临孤岛凸起, 西以孤西断层与渤南洼陷连通, 往东以单斜形式倾没于孤北洼陷(图1), 是受孤西断层、孤北断层、埕南及其南台阶断层控制的下古生界潜山。从2004年至今在该区下

油流外, 其它井(渤古4井、渤古401井和渤古403井)均获高产工业油气流, 展示了巨大的勘探潜力。

该潜山所属的孤北—渤南地区是沾化凹陷、乃至济阳坳陷深层(3500 m以下)油气最为富集的区域。该区天然气来源多、成因复杂, 许多学者对其成因及来源进行过研究, 并提出了不同观点^[1-7], 而对于渤古4潜山天然气迄今尚未见有报道。

作者通过综合利用天然气组分、稳定碳同位素、轻烃组成和伴生原油生物标志化合物等多种指标, 并与邻区天然气进行对比, 剖析了渤古4潜山天然气的地球化学特征和成因类型, 并结合气源岩特征和地质条件的分析, 明确了天然气来源, 对该区油气成藏研究和勘探潜力评估具有重要意义。

1 天然气地球化学特征

1.1 天然气组成

渤古4潜山各井奥陶系天然气的组分特征非常相似(表1): 均以烃类气体为主, 占气体总体积的91.39%~96.27%, 平均为93.17%; 非烃气体中以CO₂和N₂为主, 平均含量分别为5.49%和0.66%。烃类组分中, 甲烷占有绝对优势, 含量在78.66%~

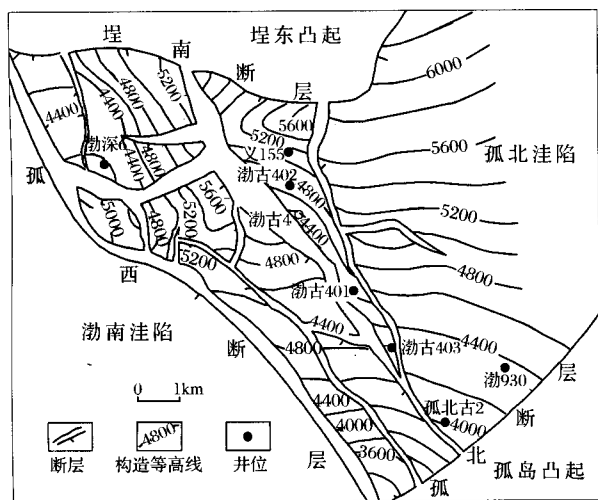


图1 渤古4潜山构造位置

古生界陆续部署了4口探井, 除渤古402井获低产

收稿日期: 2007-02-04; 修回日期: 2007-07-31.

基金项目: 国家“973”项目(编号: 2001CB209102); 国家自然科学基金项目(编号: 40572084)联合资助。

作者简介: 王力(1982-), 男, 湖北蕲春人, 博士研究生, 从事油气地质与地球化学研究。E-mail: wangli19820723@163.com.

84.47%之间,平均值为81.61%;重烃含量较高,为9.47%~12.83%,平均为11.67%;干燥系数(C_1/C_{1-5})为0.86~0.90,属于湿气。

表1 渤古4潜山天然气组分特征

井号	层位	深度(m)	C_1 (%)	C_2+ (%)	CO_2 (%)	N_2 (%)	C_1/C_{1-5}
渤古4	O	4 375~4 413	83.20	9.47	6.20	0.70	0.90
渤古4	O	4 375~4 460	81.96	10.18	7.39	0.44	0.89
渤古401	O	3 971~4 047	82.38	11.37	5.62	0.11	0.88
渤古401	O	3 971~4 090	84.47	11.80	0.65	0	0.88
渤古403	O	3 806.55~3 966	78.66	12.73	6.65	1.50	0.86
渤古403	O	3 806.55~3 966	78.98	12.83	6.86	0.88	0.86

1.2 稳定碳同位素特征

天然气中甲烷及其同系物的碳同位素组成主要受母质类型和成熟度影响,是划分天然气成因类型、判识其来源的重要指标^[8-14]。其中 $\delta^{13}C_2$ 主要反映母

质特征,受热演化影响相对较小,一般将 $\delta^{13}C_2 = -28\text{‰}$ 作为油型气和煤成气的分界标志^[12,15-16]。渤古4潜山各井奥陶系天然气碳同位素特征相近, $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_2$ 值分别介于 $-38.2\text{‰} \sim -37.0\text{‰}$ 和 $-25.0\text{‰} \sim -23.4\text{‰}$ 之间,根据上述标准应为煤成气。然而孤北—渤南地区深层天然气碳同位素尤其是 $\delta^{13}C_2$ 值普遍偏重(表2),如渤深6潜山油型气的 $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_2$ 值分别为 -40.8‰ 和 $-27.7\text{‰} \sim -27.6\text{‰}$,以油型气为主的渤南深洼带分别为 $-39.1\text{‰} \sim -37.7\text{‰}$ 和 $-26.7\text{‰} \sim -25.0\text{‰}$,而主要发育煤成气的孤北潜山C—P天然气 $\delta^{13}C_2$ 值基本都大于 -23.1‰ ,渤930井更达 -16.8‰ ^①,这可能与该区岩浆和深部热流体活动有关^②。此外,该区天然气碳同位素系列基本都发生了倒转,可能普遍存在混源现象^[17],充分说明了天然气成因类型复杂,需要结合本区特征综合分析。

表2 渤古4潜山及邻区天然气碳同位素组成特征

区块	井号	层位	深度(m)	$\delta^{13}C_1$ (‰)	$\delta^{13}C_2$ (‰)	$\delta^{13}C_3$ (‰)	$\delta^{13}C_4$ (‰)
渤古4潜山	渤古4	O	4 375~4 460	-38.2	-24.9	-22.5	-23.6
	渤古4	O	4 375~4 460	-38.1	-25.0	-22.4	-23.5
	渤古403	O	3 806.55~3 966	-37.1	-23.4	-22.4	-23.4
	渤古403	O	3 806.55~3 966	-37.0	-23.8	-22.1	-23.8
渤深6潜山	渤深6	O	4 165~4 262	-40.8	-27.6	-24.5	-24.8
	渤601	O	4 733.8~4 862	-40.8	-28.7	-25.8	-26.1
孤北潜山	孤北古1	C—P	4 020.9~4 139.5	-35.9	-23.1	-21.2	-21.2
	义155	C—P	4 528.8~4 574	-32.2	-22.0	-21.5	-20.9
	渤930	C—P	3 546.2~3 650	-35.5	-16.8	-16.1	-15.4
渤南深洼带	渤深3	E_{s4}	4 450~4 472	-39.1	-26.7	-23.4	-23.9
	义115	E_{s4}	5 144~5 163	-37.7	-25.0	-24.8	
渤深4断阶带	渤深4	E_{s4}	3 898.6~3 924.4	-52.7	-30.8	-28.2	-28.1
	义170	E_{s4}	3 806.1~3 829	-52.6	-31.2	-27.3	-27.2

为了减小碳同位素偏重的影响,现利用其差值来探讨天然气成因^[18]。图2表明,渤深4断阶带天然气为典型的油型伴生气;渤深6潜山天然气位于高成熟油型气和伴生气交界处,与主要源自渤南洼陷 E_{s4} 气源岩并混有 E_{s3} 伴生气相一致;渤南深洼带和孤北潜山C—P天然气分别落入了高成熟油型气和煤成气的范围;而渤古4潜山奥陶系天然气位于二者交界处,且碳同位素序列发生了局部倒转,表明其很可能是由油型气和煤成气混合而成。

1.3 轻烃组成

轻烃是指沸点在 200℃ 以前的汽油烃,即分子碳数为 C_{5-10} 的化合物^[19],目前分析并应用于油气勘

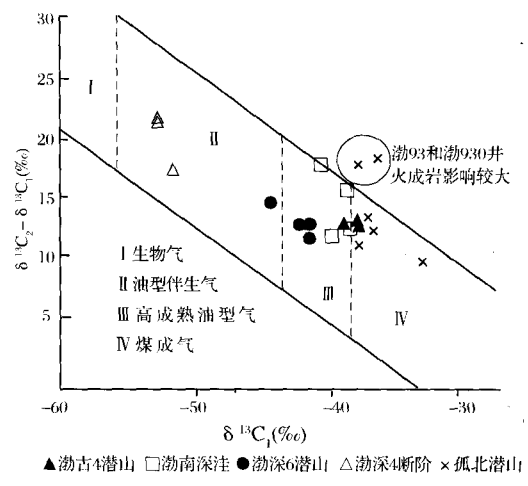


图2 $\delta^{13}C_1$ 与 $\Delta\delta^{13}C_{2,1}$ 判识天然气成因

① 金强,王力,程付启,等.胜利山东探区中深层天然气成因的地质地球化学研究.内部研究报告,2006.
② 万丛礼.沾化凹陷孤北地区深层气成藏模式研究.内部研究报告,2007.

探研究的主要是 C_{6-7} 的化合物。由于天然气中不同程度地都含有一定量的轻烃,它们的形成和演化与天然气息息相关,而轻烃异构体非常丰富,信息量远大于气态烃类,因此国内外许多学者利用轻烃对天然气进行了成因判识、气源对比等研究,并取得了令人满意的效果^[19-24]。

C_7 轻烃系统是非常有效的天然气母质类型判识指标,包括 3 类化合物:正庚烷(nC_7)、甲基环己烷(MCC_6)和各种结构的二甲基环戊烷($\Sigma DMCC_5$)。其

中,甲基环己烷主要来自高等植物,是煤成气中轻烃的特点;二甲基环戊烷主要源自水生生物,是油型气中轻烃的特征^[22]。孤北潜山 C—P 天然气 C_7 族组成以 MCC_6 为主,主要分布在煤成气区;渤深 6 潜山和渤深 4 断阶天然气均落入了油型气的范畴(图 3a),与碳同位素的特征相吻合。渤古 4 潜山天然气具有高 nC_7 含量(为 45%~55%)、低 MCC_6 含量(介于 33%~35%之间)的特征,指示其以油型气为主。

甲基环己烷指数和环己烷指数也是良好的母质

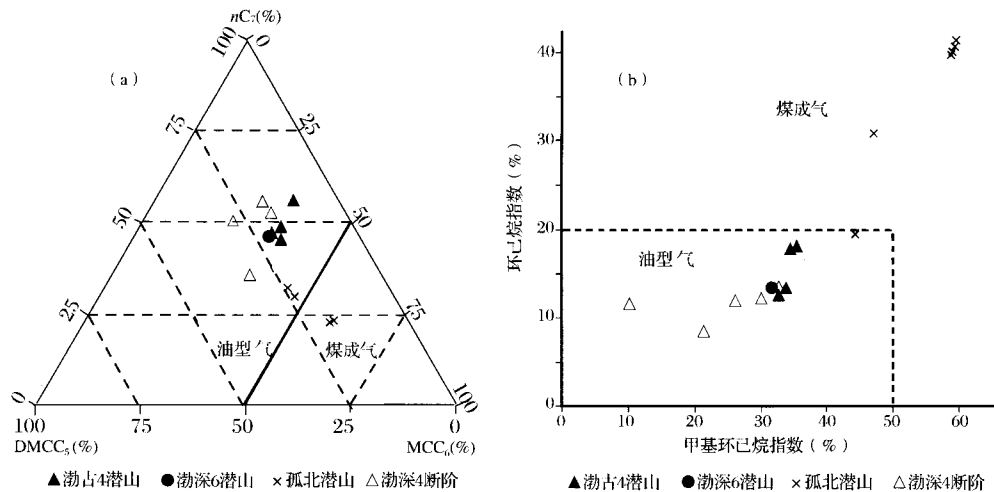


图 3 利用轻烃组成判识渤古 4 潜山天然气母质来源

类型参数^[23],可以有效判识孤北—渤南地区深层天然气的成因(图 3b)。孤北潜山 C—P 天然气主要为煤成气,渤深 6 潜山和渤深 4 断阶天然气均属油型气,与 C_7 轻烃系统的判识结果相同。渤古 4 潜山天然气的上述 2 个参数分别为 33%~35%和 17%~18%,表明其主要为油型气。结合天然气碳同位素特征,认为渤古 4 潜山天然气属于以油型气为主的混源气。

轻烃不仅能够指示天然气的母质来源,也能反映热演化程度^[19]。随着成熟度的增加,庚烷值和石蜡指数均逐渐增大。渤古 4 潜山奥陶系天然气的这 2 个参数分别为 27%~30%和 1.6~1.8,稍高于渤

深 6 潜山(25%~31%和 1.3~1.5,对应 R_o 约为 1.3%^①),表明其达到了高成熟阶段。

1.4 伴生油特征

伴生油与天然气往往具有密切的亲缘关系,而原油比天然气蕴含更为丰富的地球化学信息,因此对其分析将有助于天然气成因类型的判识。

渤古 4 潜山奥陶系轻质油饱和烃具明显姥姦烷优势(图 4),Pr/Ph 值为 1.18~1.41。甾烷组成中,孕甾烷、升孕甾烷含量非常丰富,重排甾烷含量较低。反映成熟度的 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 值和 Ts/Tm 值分别为 0.49~0.51 和 0.97~1.84,表明其为高成熟原油,与天然气热演化特征相似。萜烷系

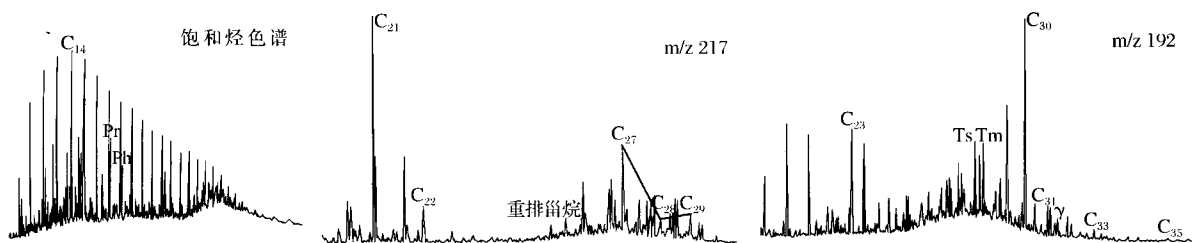


图 4 渤古 4 潜山奥陶系轻质油生物标志化合物特征

① 金强,王力,程付启,等. 胜利山东探区中深层天然气成因的地质地球化学研究. 内部研究报告,2006.

列还具有低伽马蜡烷含量特征,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值为0.11。总之,该原油既具煤系原油特征,也含盐湖相原油的特点^[25],说明其为盐湖相和煤系混合成因。以上分析表明,渤古4潜山奥陶系天然气由油型气和煤成气混合而成,其中又以油型气为主,应该处于高成熟阶段。

2 天然气来源

孤北—渤南地区深层主要发育渤南洼陷 Es_4^f 、 Es_3^f 和孤北 C—P 3套气源岩。

渤南洼陷 Es_4^f 为典型的咸水湖相沉积,发育含膏泥页岩,具有低 Pr/Ph 值和高伽马蜡烷含量的特征(表3);TOC为1.0%~2.0%,发育 I 型和 II₁ 型干酪根,处于成熟—高成熟阶段,是渤深6潜山的主要油气供给者。

Es_3^f 属于淡水湖沉积,Pr/Ph 值高,伽马蜡烷含量低;有机质含量高,类型好,但位于成熟阶段,故主要生成油型伴生气。

孤北 C—P 则是一套煤系地层,发育黑色煤、碳质泥岩和深灰、灰黑色泥岩,具极高 Pr/Ph 值和低伽马蜡烷含量;有机质含量丰富,以 III 型母质为主,也位于成熟—高成熟阶段,为孤北潜山 C—P 气藏提供了气源。

通过对天然气地球化学特征的分析,并结合气源岩的特征认为,渤古4潜山天然气由渤南洼陷 Es_4^f 和孤北 C—P 来源天然气混合而成。其伴生油特征也介于渤南洼陷 Es_4^f 泥岩和孤北 C—P 煤系2套烃源岩之间(表3),进一步证实了2种母质来源的混合成因。

煤系烃源岩以生气为主、生油为辅,而腐泥型烃

表3 孤北—渤南地区深层气源岩地质地球化学特征

区带	层位	岩性	TOC(%)	有机质类型	R_o (%)	Pr/Ph	C_{21-22} 甾烷	γ/C_{30} 藿烷
渤南 洼陷	Es_4^f	含膏泥岩、泥岩	1.0~2.0	I~II ₁ 型	1.26~1.56	<0.65	丰富	0.2~0.8
	Es_3^f	泥岩、油页岩	1.9~3.0	I~II ₁ 型	0.71~1.12	0.6~1.5	低	<0.2
孤北 地区		煤	42.2~67.1					
	C—P	碳质泥岩	1.44~8.15	III型为主	1.16~1.77	1.67~2.34	较低	0.07~0.2
		泥岩	0.72~4.18					

源岩则同时具有较高的生油和生气潜力^[13]。以 C—P 煤系来源为主的孤北潜山气藏具有较高的天然气产量,但产油量极少(表4);以渤南洼陷 Es_4^f 来源为

主的渤深6潜山油气藏则同时具有较高的天然气和原油产量。渤古4潜山油气藏也具有高天然气和原油产量的特征,表明其以 Es_4^f 腐泥型来源为主, C—

表4 渤古4潜山及临区试油结果

区带	井号	层位	深度(m)	油嘴(mm)	天然气(m^3/d)	原油(t/d)
渤古4潜山	渤古4	O	4 375~4 413	8	7.574×10^4	47.4
	渤古401	O	3 971~4 047	8	16.295×10^4	77.9
孤北潜山	孤北古1	C—P	4 120.6~4 139.5	6	11.1×10^4	0.002
	渤930	C—P	3 617.1~3 639.2	5	8 960	0
渤深6潜山	渤深6	O	4 165~4 262	6	2.538×10^4	133
	渤601	O	4 733.8~4 862	10	4.743×10^4	85.7

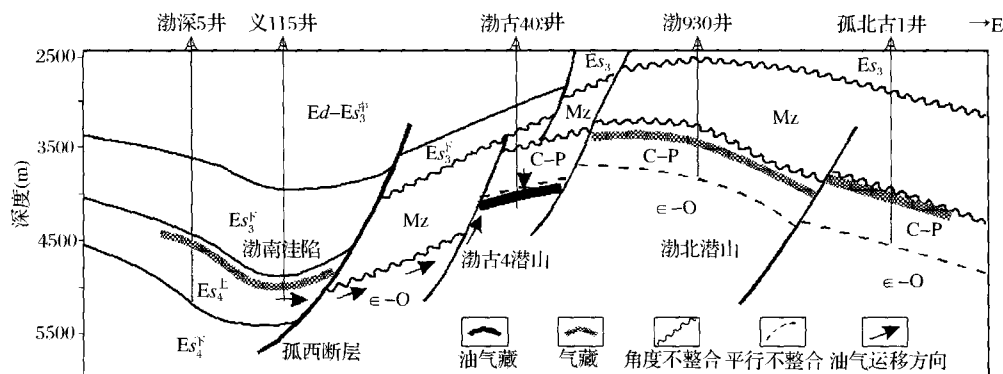


图5 渤古4潜山下古生界天然气成藏模式

P 煤系来源为辅。这与天然气地球化学特征的认识相吻合。

渤古 4 潜山天然气的混源成因与其成藏条件密切相关。

如图 5 所示, 该潜山临近渤南洼陷, 并位于 $E_{s_4}^+$ 气源岩的上倾部位, 长期活动的孤西断层^[25]和物性优越的不整合面为油气运移提供了良好的通道, 而 $E_{s_3}^+$ 来源的天然气则难以运移至渤古 4 潜山。C—P 煤系气源岩直接覆盖在气藏之上, 不仅可以提供气源, 还能对油气藏起到较好的封盖作用。

此外, 奥陶系储层一方面由于风化淋滤形成了许多溶蚀裂缝和溶洞, 另一方面又受到断层影响, 构造裂缝十分发育, 储集物性得到了极大地改善, 有利于高产油气藏的形成。

因此, 渤古 4 潜山不仅能够聚集渤南洼陷 $E_{s_4}^+$ 来源的油型气, 也有孤北 C—P 来源的煤成气。

3 结论

(1) 渤古 4 潜山各井天然气特征十分相近: 均以烃类气体为主, 重烃含量较高, 为湿气; 碳同位素系列较重, 并发生了局部倒转; 轻烃中具有高正庚烷含量和低甲基环己烷、环己烷含量, 主要为高成熟油型气与部分煤成气相混合。

(2) 伴生油具有与天然气类似的成因。

(3) 孤北—渤南地区深层发育渤南洼陷 $E_{s_4}^+$ 盐湖相、 $E_{s_3}^+$ 淡水湖相和孤北 C—P 煤系 3 套气源岩, 渤古 4 潜山天然气主要来源于渤南洼陷 $E_{s_4}^+$ 烃源岩, 孤北 C—P 煤系也具有一定贡献; 孤西断层和不整合面为渤古 4 潜山天然气的运移提供了通道。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 陈科贵, 张学才, 何家雄, 等. 渤海湾盆地济阳拗陷胜利油区岩性油气藏形成的充满度主控因素剖析[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(3): 366-369.
- [5] 刘朝露, 夏斌. 济阳拗陷中生代原型盆地的初步恢复及其主控因素[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 60-63.
- [6] 庞雄奇, 李丕龙, 金之钧, 等. 油气成藏门限研究及其在济阳拗陷中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 204-209.
- [7] 李明娟, 张洪年, 胡宗全, 等. 济阳拗陷古生界层序地层研究[J]. 石油与天然气地质, 2004, 15(6): 646-649.
- [8] Faber E, Stahl W. Gaseous hydrocarbons of unknown origin found while drilling[J]. Org Geochem, 1987, 13(10): 875-879.
- [9] 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]. Org Geochem, 1996, 24(10): 947-955.
- [10] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 3(2/3): 1-40.
- [11] 刘文汇, 刘全有, 徐永昌, 等. 天然气地球化学数据的获取及应用[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(1): 30-44.
- [12] 徐永昌. 天然气成因理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 68-222.
- [13] 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.
- [14] 刘文汇, 徐永昌. 天然气成因类型及判别标志[J]. 沉积学报, 1996, 14(1): 110-116.
- [15] 谢增业, 李剑, 卢新卫. 塔里木盆地海相天然气乙烷碳同位素分类与变化的成因探讨[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(6): 27-29.
- [16] 戴金星, 夏新宇, 秦胜飞, 等. 中国有机烷烃气碳同位素系列倒转的成因[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 1-6.
- [17] 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.
- [18] 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: 75-82.
- [19] Leythaeuser D, Schaefer R G, Cornford C. Generation and migration of light hydrocarbon (C_2-C_7) in sedimentary basins[J]. Org Geochem, 1979, 1: 191-214.
- [20] Snowdon L R, Powell T G. Immature oil and condensate — modification of hydrocarbon generation model for terrestrial organic matter[J]. AAPG, Bulletin 1982, 66(6): 775-788.
- [21] 廖永胜. 罐装岩屑轻烃和碳同位素在油气勘探中的应用[G]//戴金星, 张厚福, 郝石生, 等. 天然气地质研究论文集. 北京: 石油工业出版社, 1989: 138-144.
- [22] 胡惕麟, 戈葆雄, 张义纲, 等. 源岩吸附轻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.
- [23] 沈平, 陈践发, 彭韵硕. 轻烃中 C_6 族组成和芴系化合物与沉积环境的关系[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 68-75.
- [24] 朱光有, 金强, 张善文, 等. 渤南洼陷盐湖—咸水湖沉积组合及其油气聚集[J]. 矿物学报, 2004, 24(1): 25-30.
- [25] 常国贞, 毕彩芹, 林红梅. 低潜山反转构造演化、成藏体系与勘探——以胜利油区孤北低潜山为例[J]. 断块油气田, 2002, 9(5): 19-23.

(上接第 719 页)

THE GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF NATURAL GAS AND DISCUSSION ON GAS SOURCE IN BOGU 4 BURIED HILL

WANG Li¹, JIN Qiang¹, LIN La-mei¹, YIN Chang-he², SONG Gao-qi²

(1. *China University of Petroleum, Dongying 257061, China;*

2. *Academy of Geological Science, Shengli Oil Field Company, Dongying 257015, China*)

Abstract: The deep natural gas in the Gubei-Bonan area is characterized as multi-source and complex genesis, and source-mixed gas reservoirs are generally formed. In view of this problem, many parameters including chemical component, carbon isotope and light hydrocarbon composition of natural gas and biomarkers of associated crude oil, were used to clarify the geochemical characteristics and genesis of Ordovician natural gas in the Bogu 4 buried hill, in comparison with the geochemistry of natural gas nearby. It is proposed that the natural gas would be mainly composed of high-mature oil-type gas with little mixing of coal-type gas. The gas source is determined by the geochemical characteristics of natural gas and source rocks, combining with analysis on geologic condition of gas pools. The research results show that the gas in the Bogu 4 buried hill is mainly derived from the upper layer of member 4 source rocks in the Shahejie Formation in the Bonan sag, mixed with the gas from the coal measure contribution in Permian-Carboniferous in the Gubei area, and the associated crude oils also have the similar process.

Key words: Natural gas; Geochemical characteristics; Analysis on gas source; Bogu 4 buried hill; Zhanhua depression.