

DOI: 10.13745/j.esf.2018.02.012

乍得 Bongor 盆地天然气地球化学特征及成因

程顶胜¹, 窦立荣², 王景春^{2,*}, 李威^{1,3}, 文志刚³

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国石油国际勘探开发有限公司, 北京 100034

3. 长江大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100

CHENG Dingsheng¹, DOU Lirong², WANG Jingchun^{2,*}, LI Wei^{1,3}, WEN Zhigang³

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

2. China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation Ltd., Beijing 100034, China

3. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China

CHENG Dingsheng, DOU Lirong, WANG Jingchun, et al. Geochemical characteristics and genesis of natural gas in the Bongor Basin. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 112-120

Abstract: The Bongor Basin, located in the northwest part of the Central African Shearing Zone in Chad, is one of the most prolific basins of the Mesozoic – Cenozoic era. In this study, chemical composition and carbon/hydrogen isotopic analysis were performed on natural gas samples by routine geochemical methods to investigate the origin and maturity difference of natural gas in different structural units of the Bongor Basin. The results showed that the chemical compositions of the natural gas analyzed are mainly hydrocarbon and non-hydrocarbon gases with trace amount of rare gases. Hydrocarbon gases belong to organic gas, such as biogenetic and thermal cracking gases, while inorganic gases included N₂, CO₂ and H₂, etc. Gas-gas and gas-source correlations were obtained to determine the organic source of the natural gas. It showed that the minor composition dissimilarity in these gases are attributable to facies variations in different structural units, namely the M, P and possibly K group dark clay shale facies; whereas gases generated by organic source rocks in different structural units exhibit large difference in maturity, simply because they were generated in different thermal evolution stages.

Key words: Bongor Basin; isotope; natural gas; maturity; genetic type; Chad

摘要: Bongor 盆地位于乍得境内的中非剪切带西北部,是中新生代重要的含油气盆地之一。笔者从 Bongor 盆地天然气组分组成及组分碳、氢同位素分析入手,综合运用常规有机地球化学分析方法,探讨了 Bongor 盆地不同构造单元天然气的成因及成熟度差异。分析认为, Bongor 盆地天然气化学组成主要由烃类气体、非烃类气体和微量稀有气体组成,其中烃类气体属于生物-热催化过渡带气、原油伴生气和凝析油伴生气等有机成因气,非烃气体主要包括无机成因的氮气、二氧化碳和氢气等。在天然气成因研究的基础上,笔者还开展了 Bongor 盆地烃类气体的组成及来源分析,包括气-气对比和气-源对比,研究认为,不同构造单元的烃类气体虽然组成相同,但相对含量略有差异,表明不同构造单元的天然气的具有相似的母质来源; M 组和 P 组的暗色泥页岩; 但也不排除 K 组暗色泥页岩的生烃贡献。不同构造单元天然气烃类气体的成熟度差异较大,这是由于天然气源自不同层位烃源岩或同一层位烃源岩在不同演化阶段的生烃产物。

关键词: Bongor 盆地; 同位素; 天然气; 成熟度; 成因类型; 乍得

中图分类号: P618.130.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2018)02-0112-09

收稿日期: 2017-08-10; 修回日期: 2017-10-20

基金项目: 中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(2016D-4302); 国家科技重大专项 29 课题五“海外重点探区目标评价与未来领域选区选带研究”(2016ZX05029005)

作者简介: 程顶胜(1966—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海外油气勘探、油气地球化学研究。E-mail: chengdingsheng@petrochina.com.cn

* 通讯作者简介: 王景春(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事海外油气勘探与开发工作。E-mail: wangjingchun@cnpcic.com

0 引言

乍得 Bongor 盆地作为非洲重要的含油气盆地, 位于中非剪切带西北部, 是中新生代的被动裂谷盆地, 盆地近 EW 向, 面积 18 000 km², 由北向南可以划分为北部斜坡、中央坳陷、南部隆起、南部坳陷 (图 1)。近年来, 随着油气勘探开发的深入, 在 Bongor 盆地勘探发现了一系列的天然气资源, 并进行了有针对性地开展, 由此开创了油气并举的新局面。因此, Bongor 盆地在非洲地区天然气分布格局中越来越重要。肖坤叶等^[1]对 Bongor 盆地石油地质综合特征均有研究, 认为 Bongor 盆地早白垩世为强烈断陷期, 晚白垩世至古近纪盆地反转、抬升, 上白垩统剥蚀殆尽, 现今主要发育下白垩统、古近系、新近系、第四系地层, 其中下白垩统地层为主要沉积地层, 也是该盆地最重要的勘探目的层系, 自下而上分为 P 组、M 组、K 组、R 组、B 组。断陷期发育的 P 组、M 组广泛发育厚层暗色泥岩, 综合评价为成熟的好-极好烃源岩^[2]。但是对于盆地天然气的组成特征及其成因等研究则少有涉及, 结合目前天然气产状来看, Bongor 盆地在下白垩统 P 组、M 组、K 组、R 组、B 组地层中均有天然气产出, 在平面上分布于不同构造单元。本文选择了 4 个构造单元不同

层位的 7 个天然气样品 (表 1, 井位见图 1), 针对 Bongor 盆地天然气在平面、纵向的独特分布特征, 利用常规地球化学分析方法对天然气组成、同位素、成熟度进行分析, 同时根据不同构造单元天然气的特征厘清其来源, 以期对天然气勘探开发提供科学依据。

1 天然气组成特征

1.1 组分特征

天然气化学组分是天然气成因判别的直接标志, 其组成变化受母质类型和成熟度的双重影响。Bongor 盆地天然气的化学组成主要由烃类气体、非烃类气体和微量稀有气体组成。烃类气体中主要含有甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷和己烷等, 非烃气体主要包括氮气、二氧化碳和氢气等, 微量稀有气体氦等^[3]。

Bongor 盆地天然气大都以烃类气体为主 (表 1), 总烃含量一般为 89.79%~96.50%。其中, 甲烷含量为 73.77%~92.28%, 乙烷含量为 1.80%~12.25%, 丙烷含量为 1.38%~6.66%; 其他烃类含量分别为: 异丁烷 0.37%~1.51%, 正丁烷 0.37%~1.34%, 异戊烷 0.11%~0.33%, 正戊烷 0.08%~0.27%, 己烷 0.08%~0.36%。非烃气体总量为 3.5%~10.21%。其中, 氮气含量 1.36%~8.14%, 二氧化碳含量 1.54%~3.94%。

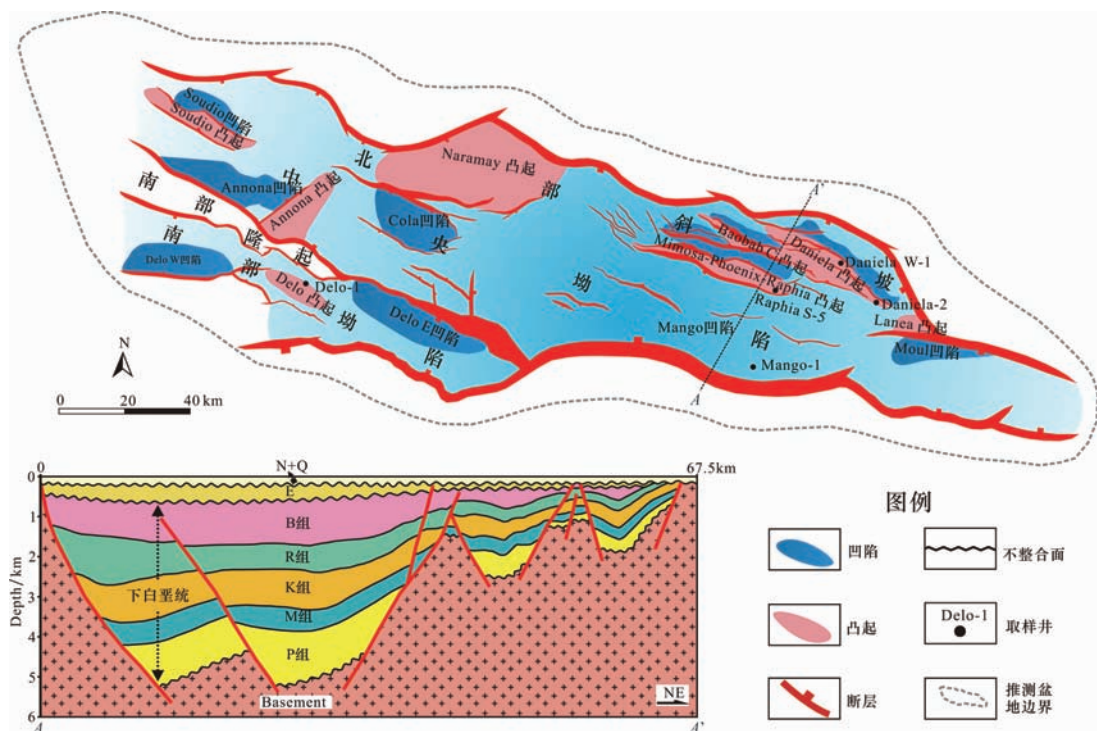


图 1 Bongor 盆地构造纲要图

Fig. 1 Sketch structural map of Bongor Basin

表 1 Bongor 盆地天然气组分数据表
Table 1 Content of natural gas compositions of Bongor Basin

井号	构造单元	层位	深度/m	天然气组分含量/%									
				甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	己烷	氮	二氧化碳
Delo-1	Delo 凸起	B	1 666.9~1 669.2	74.78	6.82	5.15	1.28	1.14	0.27	0.20	0.16	8.14	2.02
		B	1 527.3~1 530.7	73.77	7.94	6.01	1.51	1.34	0.33	0.24	0.20	7.04	1.56
Mango-1	Mango 凹陷	R	2 033.6~2 038.31	81.08	6.19	3.02	0.62	0.72	0.14	0.15	0.08	4.04	3.94
		R	1 843.01~1 848.7	80.60	8.45	3.90	0.71	0.89	0.17	0.18	0.11	1.72	3.27
Raphia S-5	Mimosa-Phoenix-Raphia 凸起	P	1 297.4~1 303.7	80.23	8.24	3.65	0.57	0.93	0.20	0.27	0.36	3.95	1.54
Daniela-2	Daniela 凸起	M	1 146~1 156	73.81	12.25	6.66	0.70	1.24	0.19	0.21	0.15	1.61	3.17
Daniela W-1		K	779.6~782.8	92.28	1.80	1.38	0.37	0.37	0.11	0.08	0.11	1.36	2.12

表 2 Bongor 盆地天然气组分碳同位素组成数据表
Table 2 Carbon isotopic data of natural gas compositions of Bongor Basin

井号	深度/m	层位	碳同位素值 $\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$				
			甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	CO ₂
Delo-1	1 666.9~1 669.2	B	-49.5	-38.3	-31.8	-30.6	
Delo-1	1 527.3~1 530.7	B	-49.5	-38.5	-31.8	-29.5	
Mango-1	2 033.6~2 038.31	R	-38.5	-33.1	-31.3	-29.6	
Mango-1	1 843.01~1 848.7	R	-39.4	-33.3	-30.9	-29.8	-6.0
Raphia S-5	1 297.4~1 303.7	P	-44.1	-36.0	-32.3	-31.3	2.5
Daniela-2	1 146~1 156	M	-48.8	-37.1	-33.8	-32.8	-5.1
Daniela W-1	779.6~782.8	K	-52.7	-38.8	-35.2	-32.9	-5.9

1.2 碳同位素组成

天然气各组分在生成过程中与母质碳同位素间存在着动力分馏效应,通常有机质裂解出的低分子烃中富集¹²C,而较大的分子烃中相对富集¹³C,从而使天然气组分碳同位素比率从小到依次排列($\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$)^[4]。相邻组分碳同位素组成差异与生油岩母质成熟度有关,成熟度较低时,组分间碳同位素差异明显;随着成熟度增大,其差异有减小的趋势。有时出现 $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2$ 的逆转现象。因此,可以采用碳同位素比率指标研究不同母质、不同演化阶段形成的天然气,识别天然气的成因。

Bongor 盆地天然气甲烷碳同位素统计结果表明(表 2),甲烷 $\delta^{13}C_1$ 值为 $-38.5\text{‰} \sim -52.7\text{‰}$,不同天然气样品甲烷 $\delta^{13}C_1$ 值有一定差异。Bongor 盆地天然气组分碳同位素分布呈正碳同位素系列(表 2),表现为 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$,属有机成因。

1.3 氢同位素组成

Bongor 盆地天然气组分氢同位素(表 3)中,甲烷氢同位素组成为 $-142\text{‰} \sim -238\text{‰}$,乙烷氢同位素 $-141\text{‰} \sim -248\text{‰}$,丙烷氢同位素 $-123\text{‰} \sim -187\text{‰}$,不同天然气样品的氢同位素组成有一定的差异。一

般情况下,有机成因天然气的氢同位素组成存在随源岩成熟度增大而增加的趋势,且其甲烷及其同系物的 δD 值随着烃气分子碳数的增加而增大,即 $\delta D_{CH_4} < \delta D_{C_2H_6} < \delta D_{C_3H_8}$ 。Bongor 盆地天然气中有个别样品氢同位素组成发生倒转现象,如 Delo-1 井(1 666.90~1 669.20 m、1 527.30~1 530.70 m)和 Mango-1 井(2 033.60~2 038.31 m)的天然气样品, $\delta D_{CH_4} > \delta D_{C_2H_6}$,可能与油气藏多期充注有关。

表 3 Bongor 盆地天然气组分氢同位素组成数据表
Table 3 Hydrogen isotopic data of natural gas of Bongor Basin

井号	深度/m	层位	氢同位素值 $\delta D_{VSMOW}/\text{‰}$		
			甲烷	乙烷	丙烷
Delo-1	1 666.9~1 669.2	B	-237	-248	-171
Delo-1	1 527.3~1 530.7	B	-238	-248	-168
Mango-1	2 033.6~2 038.31	R	-142	-146	-125
Mango-1	1 843.01~1 848.7	R	-142	-141	-123
Raphia S-5	1 297.4~1 303.7	P	-166	-161	-130
Daniela-2	1 146~1 156	M	-204	-202	-150
Daniela W-1	779.6~782.8	K	-222	-205	-187

Bongor 盆地天然气组分含量中(表 1),甲烷含量普遍小于 95%,最低含量只有 73.77%,且甲烷含

量与深度没有明显的关系,表现出明显的湿气特征,是为原油伴生气。

2 天然气成因类型

天然气成因类型的判识,主要依据天然气组分和碳同位素特征。科学的天然气成因鉴别,应该是对天然气中混合的各种气体组分的成因鉴别,至少也要认识其中主要组分的成因,从而确定天然气的主要成因归属。

2.1 烃类气体成因

2.1.1 有机成因气与无机成因气鉴别

有机成因的烃类气体碳同位素系列表现出正碳系列特征,即 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$ 。无机成因烃类气体碳同位素系列为负碳系列特征,即 $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4$ [5]。

Bongor 盆地天然气烃类系列碳同位素均呈现正碳系列的变化特征(图 2),说明研究区天然气烃类气体为有机成因。

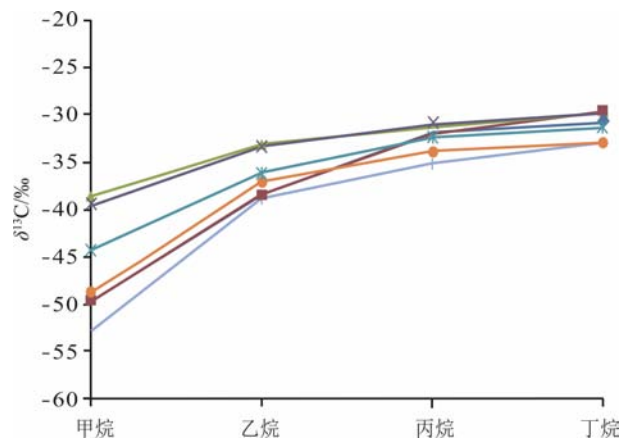


图 2 Bongor 盆地天然气烃类系列碳同位素分布图

Fig. 2 Carbon isotopic distribution of hydrocarbons

2.1.2 油型气和煤型气的鉴别

戴金星 [6-7] 综合利用国内外 1 500 多个 $\delta^{13}C_{1-3}$ 分析数据,编制了利用甲烷、乙烷、丙烷碳同位素成因鉴定图版,图版划分出 6 个区,具体对应 6 种天然气类型 [8-9]。对比该图版, Bongor 盆地天然气主要分布在 II 区,为油型气(图 3)。

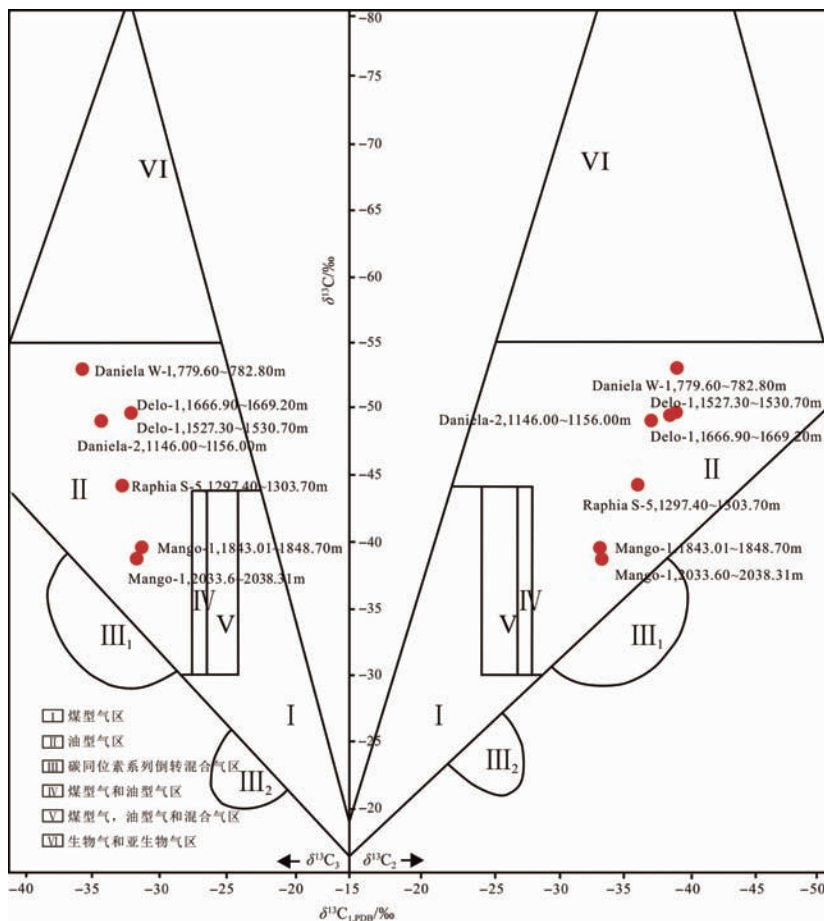


图 3 Bongor 盆地天然气 $\delta^{13}C_1$ - $\delta^{13}C_2$ - $\delta^{13}C_3$ 成因鉴别图

Fig. 3 Genetic identification of natural gas of Bongor Basin

利用 nC_7 、 MCC_6 和 $DMCC_5$ 为顶点编制的 C_7 轻烃系统三角图版可区分煤型气(II)和油型气(I)^[10](图4)。同样表明 Bongor 盆地天然气为油型气。

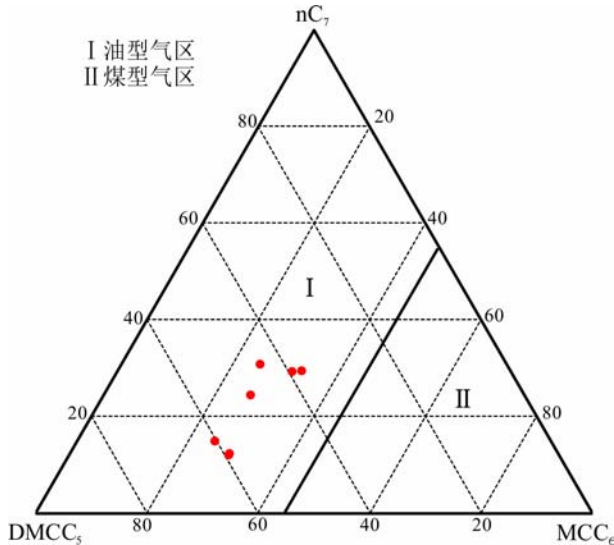


图4 Bongor 盆地天然气 C_7 轻烃系统成因鉴别
Fig. 4 Genetic identification using light hydrocarbon series of natural gas

2.1.3 天然气类型

将甲烷碳同位素与天然气组分相结合,根据大量已知成因类型的天然气研究,建立了天然气成因类型划分图版(图5)^[6-7,11-12]。在该图版上,Bongor 盆地天然气主要分为原油伴生气和凝析油伴生气。

图6为 Bongor 盆地天然气甲烷碳、氢同位素组成关系图。从图中可以看出,随着演化程度的增加,天然气甲烷碳、氢同位素相应变重的明显趋势。在该

图上,Bongor 盆地天然气分为3种类型,分别为生物-热催化过渡带气、原油伴生气和凝析油伴生气。

图7为 Bongor 盆地天然气 $\delta^{13}C_{CH_4}-C_1/C_{1-5}$ 关系图,该图将 Bongor 盆地天然气同样分为3种类型,即生物-热催化过渡带气、原油伴生气和凝析油伴生气^[13]。

2.2 非烃气体的成因

戴金星^[14]根据多个国家不同成因的二氧化碳碳同位素值与对应组分资料编绘了 $\delta^{13}C_{CO_2}-CO_2$ 关系图,作为有机与无机成因二氧化碳的鉴别图版(图8)。从图中可看出,Bongor 盆地天然气的二氧化碳碳同位素值高于-10‰,二氧化碳气体属于无机成因^[15-16]。

3 天然气成熟度

天然气成熟度系指形成天然气源岩的热演化程度。天然气组分和碳同位素特征常蕴含成熟度信息,也正是依据这些信息确定天然气成熟度。

3.1 根据甲烷碳同位素判别成熟度

根据有机质同位素分馏的基本原理,随着热演化程度的增加,天然气碳同位素变重,尤其是甲烷碳同位素值受热成熟作用影响更大。国内外学者在研究天然气成熟度时主要利用热压模拟方法,求得烃源岩模拟产物中甲烷碳同位素值随温度的变化,建立相应的 $\delta^{13}C_1-R$ 关系式。但不同研究者建立的关系略有差异(表4),原因可能与研究者实验条件、针对的目标或地区不同有关。

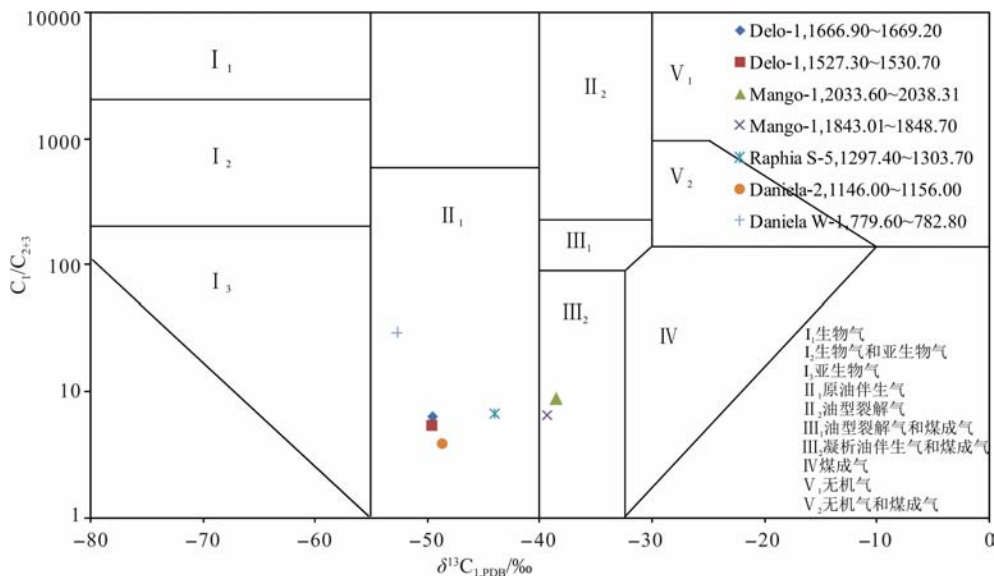
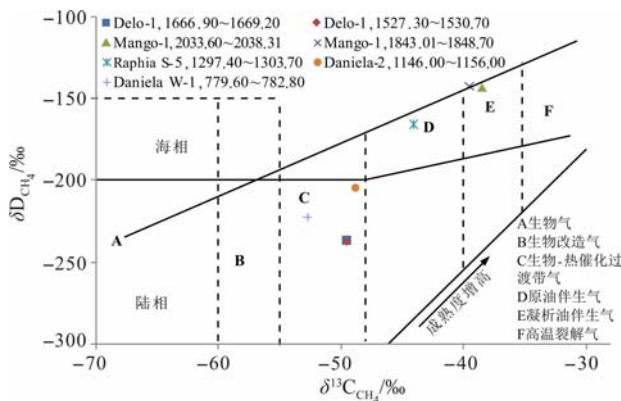
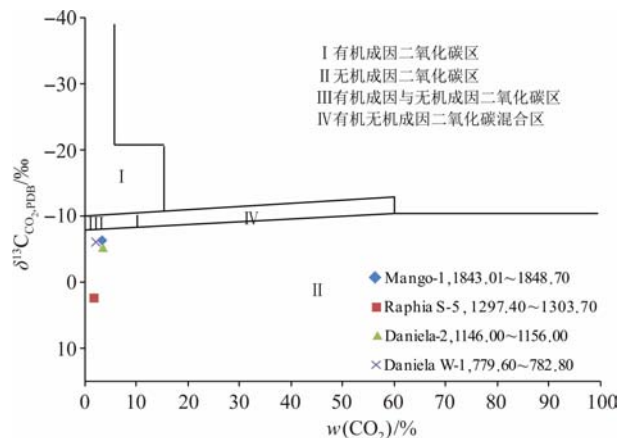
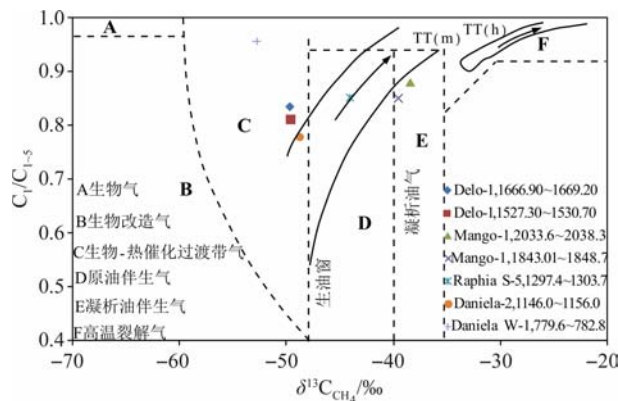


图5 Bongor 盆地天然气 $\delta^{13}C_1-C_1/C_{2+3}$ 关系图
Fig. 5 Relationship between $\delta^{13}C_1$ and C_1/C_{2+3}

图6 Bongor盆地天然气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ - $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 关系图Fig. 6 Relationship between $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ and $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 图8 Bongor盆地天然气 CO_2 成因鉴别图Fig. 8 Genetic identification of CO_2 of natural gas图7 Bongor盆地天然气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ - $\text{C}_1/\text{C}_{1-5}$ 关系图Fig. 7 Relationship between $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ and $\text{C}_1/\text{C}_{1-5}$

根据不同研究者建立的 $\delta^{13}\text{C}_1$ - R_o 关系式计算 Bongor 盆地天然气碳同位素值, 计算的成熟度如表 5。表中, Delo-1 井两个不同深度的天然气成熟度非常接近, 根据不同研究者建立的关系式计算的成熟度范围为 0.34%~0.65%, 均值为 0.47%, Daniela-2 井(1146.00~1156.00 m)天然气成熟度范围为 0.38%~0.69%, 均值 0.51%。Raphia S-5 井(1297.40~1303.70 m)天然气成熟度范围为 0.75%~0.96%, 均值为 0.85, 为成熟气。Mango-1

井两个天然气成熟度最高, 1.33%~1.71% 为高成熟气。

3.2 根据石蜡指数和庚烷值判别成熟度

在成熟度研究方面, 常用石蜡指数和庚烷值来讨论有机质的成熟度^[22]。图 9 为石蜡指数与庚烷值相关图, 从图中可以看出, Bongor 盆地天然气为成熟气, 部分天然气为高成熟气, 如 Mango-1 井(2033.6~2038.3 m, 1843.0~1848.7 m)和 Raphia S-5 井(1297.4~1303.7 m)的天然气均为高成熟气。

表5 Bongor盆地天然气成熟度统计表

Table 5 Maturity of natural gas of Bongor Basin

井号	深度/m	层位	天然气 R_o /%				
			Stahl 等 ^[17]	戴金星等 ^[19]	沈平等 ^[20]	冯子辉等 ^[21]	平均值
Delo-1	1666.90~1669.20	B	0.36	0.34	0.52	0.65	0.47
Delo-1	1527.30~1530.70	B	0.36	0.35	0.52	0.65	0.47
Mango-1	2033.60~2038.31	R	1.61	1.71	1.67	1.42	1.60
Mango-1	1843.01~1848.70	R	1.42	1.50	1.51	1.33	1.44
Raphia S-5	1297.40~1303.70	P	0.75	0.76	0.92	0.96	0.85
Daniela-2	1146.00~1156.00	M	0.40	0.38	0.56	0.69	0.51

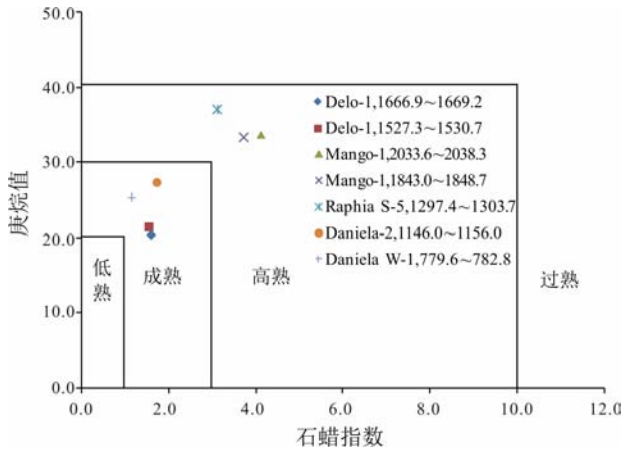


图 9 Bongor 盆地天然气石蜡指数与庚烷值相关图
Fig. 9 Relationship between paraffin index and heptane value of natural gas

如图 11, 研究区天然气轻烃参数分布特征相似, 表明天然气可能具有相似的母质来源, 可能来源于一套烃源岩, 而异庚烷及正庚烷成熟度指数的差异, 表明其可能为烃源岩在不同成熟度阶段生成。而从图 12 上可知, Mango-1 井天然气轻烃参数分布曲线与其他几个样品相比, 有一定差异, 是其源于不同的生烃灶。

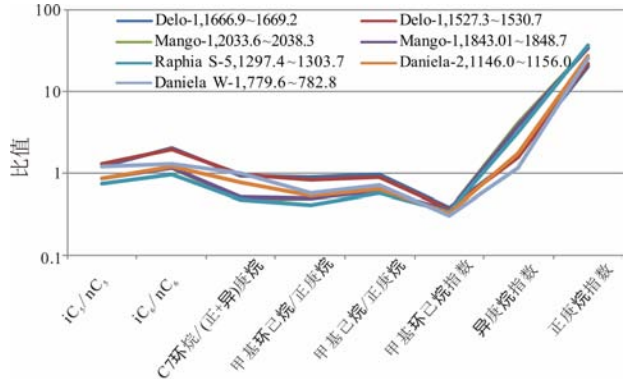


图 11 Bongor 盆地天然气轻烃参数对比图
Fig. 11 Comparison of light hydrocarbon parameters of natural gas

4 气-气对比

4.1 天然气组分对比

由天然气组分参数对比图(图 10)可以看出, Bongor 盆地天然气组分参数分布曲线相似, 判断其具有相似的生烃母质来源。

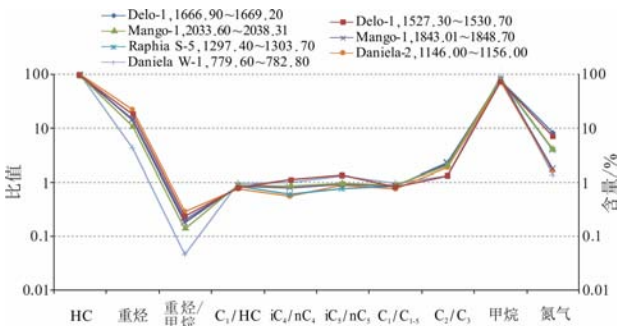


图 10 Bongor 盆地天然气组分参数对比
Fig. 10 Comparison of composition parameters of natural gas

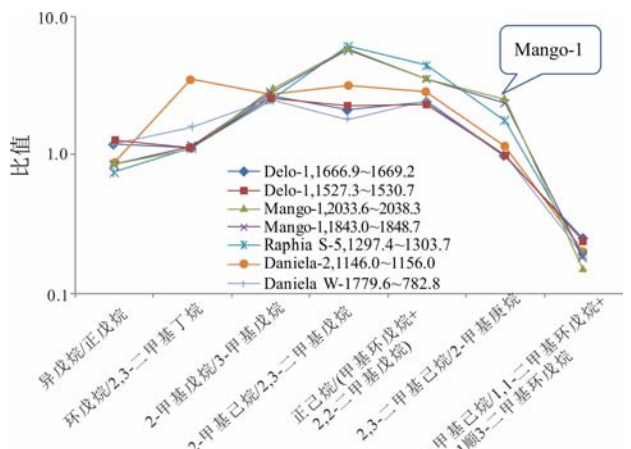


图 12 Bongor 盆地天然气轻烃参数对比图
Fig. 12 Comparison of other light hydrocarbon parameters of natural gas

4.2 轻烃参数对比

轻烃地球化学参数的应用为天然气、凝析油对比提供了基础, 尤其是为缺少信息而难以进行的天然气-烃源岩的相关性判别提供了直接对比指标, 也弥补了原油中相对低分子量烃类难于对比的困难。胡惕麟等^[23]在进行油气源对比时采用了 iC_5/nC_5 、 iC_6/nC_6 、 C_7 环烷/(正+异)庚烷、甲基环己烷/正庚烷、甲基己烷/正庚烷、甲基环己烷指数、异庚烷指数及正庚烷指数 8 个参数, 使用效果良好。

4.3 天然气甲烷及其同系物碳、氢同位素对比

由天然气组分碳、氢同位素对比图(图 13、图 14)可以看出, Bongor 盆地天然气组分碳同位素分布曲线差异较大, 可分为 2 类, 判断天然气可能来自不同的烃源岩, 也有可能来自同一烃源岩不同成熟阶段生成的产物。综合气-气对比研究认为, 研究区天然气样品具有相似特征, 同时也有一定差异, 这可能是其处于不同的构造带, 源于不同的生烃灶造成的, 如 Mango 凹陷 Mango-1 井天然气样品与其他天然气样品存在一定差异。

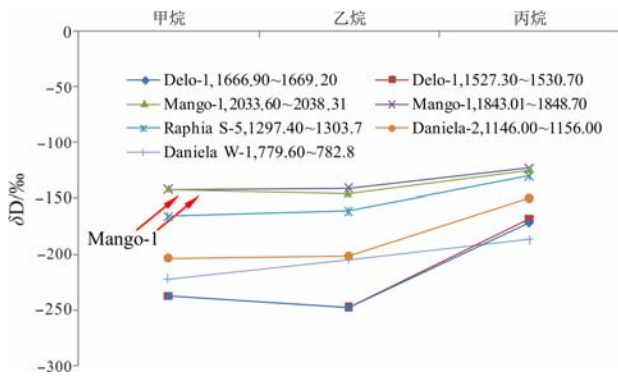


图 13 Bongor 盆地天然气组分氢同位素对比

Fig. 13 Comparison of hydrogen isotope of natural gas compositions

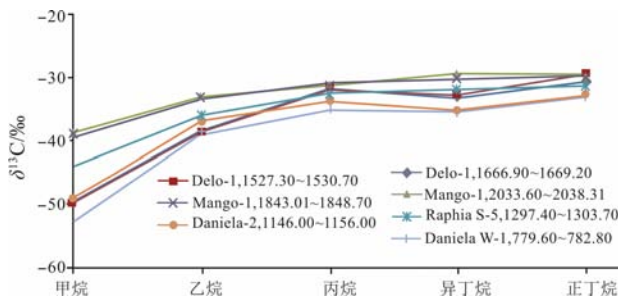


图 14 Bongor 盆地天然气组分碳同位素对比

Fig. 14 Comparison of carbon isotope of natural gas compositions

不可能来源于成熟度较低的 K 组, 而来源于 P 组和 M 组; 而部分天然气成熟度较低, 可能来源于 P 组和 M 组烃源岩在低成熟阶段的生烃产物, 但也不排除 K 组烃源岩的贡献。

表 6 Bongor 盆地地下白垩统各层位烃源岩干酪根碳同位素
Table 6 Carbon isotope of kerogen of source rocks in Lower Cretaceous

井号	井深/m	层位	样品	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	类型
Prosopis-3	1 730~1 805	K	干酪根	-28.3	I 型
Prosopis-3	1 810~1 878	K	干酪根	-28.8	I 型
Ronier 4-1	1 800~1 850	K	干酪根	-28.6	I 型
Cassia E-1	1 980~2 120	K	干酪根	-27.5	II ₁ 型
Cassia E-1	2 375~2 480	K	干酪根	-28.1	I 型
Vitex-1	2 570~2 630	K	干酪根	-25.9	II ₂ 型
Vitex-1	2 680~2 760	K	干酪根	-27	II ₁ 型
Annona-1	2 685~2 760	K	干酪根	-27.5	II ₁ 型
Tamarind-1	2 780~2 835	K	干酪根	-26.9	II ₁ 型
Prosopis C-1	1 815~1 870	M	干酪根	-29.1	I 型
Baobab S-1	1 300~1 380	M	干酪根	-30.2	I 型
Baobab S-1	1 510~1 550	P	干酪根	-30	I 型
Baobab S-1	1 695~1 775	P	干酪根	-28.8	I 型

综上所述, Bongor 盆地成熟-高成熟天然气来源于 P 组和 M 组烃源岩; 成熟度相对较低的天然气可能来源于 P 组和 M 组烃源岩低成熟演化阶段, 但也不排除来自 K 组烃源岩的可能性。

5 气源对比

5.1 碳同位素对比

表 6 是 Bongor 盆地烃源岩干酪根碳同位素统计数据, 天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 小于原油 $\delta^{13}\text{C}$, 小于 P 组和 M 组的干酪根 $\delta^{13}\text{C}$, 也显然小于 K 组干酪根 $\delta^{13}\text{C}$, 推测 Bongor 盆地天然气主要来源于 P 组和 M 组烃源岩, 但不排除 K 组烃源岩。

5.2 成熟度对比

宋换新等^[24]对 Bongor 盆地中央坳陷各组烃源岩进行详细研究认为: B 组烃源岩主体处于未成熟-低成熟阶段, R 组烃源岩主体处于低成熟阶段, K 组烃源岩主体处于成熟阶段。曾艳涛等^[25]、陈晓娜等^[26]对 Bongor 盆地西部烃源岩进行评价, 认为 B、R 组烃源岩处于未熟-低熟阶段, K 组烃源岩处于低成熟-成熟阶段, 深部 M、P 组成熟度较高, 部分烃源岩已经进入高成熟阶段。

天然气成熟度研究表明: Mango-1 井两个天然气样品是烃源岩成熟-高成熟演化阶段的产物, 而 K 组烃源岩成熟度相对较低, 故 Mango-1 井天然气

6 结论

(1) Bongor 盆地天然气主要由烃类气体、非烃类气体和微量稀有气体组成。烃类气体主要为甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷和己烷等; 非烃气体主要为氮气和二氧化碳。

(2) Bongor 盆地天然气烃类气体为有机成因, 包括生物-热催化过渡带气、原油伴生气和凝析油伴生气; CO_2 等非烃气体属于无机成因。Bongor 盆地天然气成熟度变化较大, 未熟-低熟气、成熟气、高熟气均存在。

(3) Bongor 盆地天然气组成具有相似特征, 表明具有相似的母质来源, 但天然气成熟度变化较大, 这是其处于不同构造单元、不同的生烃灶、或来自同一烃源岩不同成熟阶段的生烃产物。

参考文献

[1] 肖坤叶, 赵健, 余朝华, 等. 中非裂谷系 Bongor 盆地强反转

- 裂谷构造特征及其对油气成藏的影响[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 172-180.
- [2] 窦立荣, 肖坤叶, 胡勇, 等. 乍得 Bongor 盆地石油地质特征及成藏模式[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 379-386.
- [3] 王登, 徐耀辉, 文志刚, 等. 曾母盆地中部地区天然气与凝析油地球化学特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1205-1213.
- [4] 刘景东, 刘光祥, 王良书, 等. 川东北元坝-通南巴地区二叠系-三叠系天然气地球化学特征及成因[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 417-428.
- [5] 王鹏, 沈忠民, 刘四兵, 等. 四川盆地陆相天然气地球化学特征及对比[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1186-1195.
- [6] 戴金星. 各类天然气的成因鉴别[J]. 中国海上油气, 1992, 6(1): 11-19.
- [7] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. 中国科学: B 辑, 1992, 22(2): 185-193.
- [8] 李爱荣, 李净红, 张金功. 建南气田天然气地球化学特征及成因[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1199-1209.
- [9] 戴金星, 戚厚发. 我国煤成烃气的 $\delta^{13}\text{C-R}_o$ 关系[J]. 科学通报, 1989, 34(9): 690-692.
- [10] 王杰, 顾忆, 饶丹, 等. 塔河油田奥陶系天然气地球化学特征、成因及运移充注规律研究[J]. 地球化学, 2007, 36(6): 633-637.
- [11] 徐深谋, 邓已寻, 王鑫峰, 等. 鄂尔多斯盆地永利探区上古生界天然气地球化学特征及气源探讨[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 18-21.
- [12] WHITICAR M J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane[J]. Chemical Geology, 1999, 161(1): 291-314.
- [13] 曹军, 刘成林, 马寅生, 等. 柴达木盆地东部石炭系海陆过渡相煤系页岩气地球化学特征及成因[J]. 地球科学, 2016, 23(5): 158-166.
- [14] 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, 4(2): 1-40.
- [15] 吴小奇, 刘光祥, 刘全有, 等. 四川盆地元坝气田长兴组-飞仙关组天然气地球化学特征及成因类型[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(11): 2155-2165.
- [16] DAI J, SONG Y, DAI C, et al. Geochemistry and accumulation of carbon dioxide gases in China[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(10): 1615-1626.
- [17] STAHL W J, CAREY B D. Source-rock identification by isotope analyses of natural gases from fields in the Val Verde and Delaware Basins, West Texas[J]. Chemical Geology, 1975, 16(4): 257-267.
- [18] SCHOELL M. Dual origin of natural gases in Subalpine Tertiary Basins[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(3): 522-522.
- [19] 戴金星, 戚厚发, 宋岩. 鉴别煤成气和油型气若干指标的初步探讨[J]. 石油学报, 1985, 6(2): 31-38.
- [20] 沈平, 徐永昌, 王先彬. 气源岩和天然气地球化学特征及成气机理研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991.
- [21] 冯子辉, 陈安定, 刘桂霞, 等. 生物甲烷形成实验与生物气聚集的有利地质条件探讨[J]. 石油学报, 1991, 12(3): 7-16.
- [22] THOMPSON K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47(2): 303-316.
- [23] 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): 375-394.
- [24] 宋换新, 文志刚, 曾艳涛. 邦戈尔盆地中部凹陷烃源岩地球化学特征[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(5): 629-632.
- [25] 曾艳涛, 文志刚, 宋换新. 乍得 Bongor 盆地西部凹陷 K 组烃源岩地球化学特征研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(6): 1121-1126.
- [26] 陈晓娜, 文志刚, 宋换新. 非洲乍得 Bongor 盆地西部凹陷烃源岩评价[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(8): 20-23.