

doi: 10.11720/wtyht.2024.2158

胡益涛, 张焕旭, 倪朋勃, 等. 多组分碳同位素录井在天然气勘探中的应用——以琼东南盆地 BD21 地区为例[J]. 物探与化探, 2024, 48(2): 348-355. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.2158>

Hu Y T, Zhang H X, Ni P B, et al. Application of multi-component carbon isotope logging in natural gas exploration: A case study of the BD21 area, Qiongdongnan Basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(2): 348-355. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.2158>

# 多组分碳同位素录井在天然气勘探中的应用

## ——以琼东南盆地 BD21 地区为例

胡益涛<sup>1</sup>, 张焕旭<sup>2</sup>, 倪朋勃<sup>3</sup>, 郝为<sup>3</sup>, 瞿煜扬<sup>2</sup>, 校韩立<sup>2</sup>

(1. 中法渤海地质服务有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057; 2. 苏州冠德能源科技有限公司, 江苏 苏州 215129; 3. 中法渤海地质服务有限公司, 天津 300450)

**摘要:** 为了了解琼东南盆地深海油气田天然气的成藏特征, 对琼东南盆地天然气井进行了连续多组分碳同位素测量。通过对一口重点井连续碳同位素剖面测量及与周边井重点层段碳同位素值对比分析, 探讨了该井天然气的成因类型与气源。结果表明: 研究区三亚组一段以上为干气, 以生物气和亚生物气为主, 三亚组二段之下为湿气, 为热成因气, 主要是伴生气; BD21-1 区块天然气存在两种来源, 即始新统高熟油型气和特殊成因的低熟崖城组来源气。研究表明, 多组分碳同位素录井技术可用于研究天然气的成因类型、气源及成熟度。

**关键词:** 琼东南盆地; 碳同位素录井; 成因类型; 崖城组

中图分类号: TE122.14, P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)02-0348-08

## 0 引言

天然气碳同位素录井是指在钻井的同时, 对钻井液循环所带出的天然气中的甲烷、乙烷、丙烷 3 种烷烃气的碳同位素进行记录。由于传统碳同位素分析技术需要在井场采样, 然后送至实验室进行分析, 需要较长的时间, 费用也比较高, 同时, 天然气样品需要在采样容器中保存较长的时间, 会引起碳同位素分馏, 因此传统分析技术容易造成实验结果的不准确。而碳同位素录井技术为现场采样测试, 并且可以连续测量多组分碳同位素信息, 已经在加拿大西部盆地<sup>[1]</sup>、墨西哥湾豪恩山油田<sup>[2]</sup>、渤海湾盆地<sup>[3]</sup>等获得了广泛的应用。

构造深水区(水深 > 300 m) 油气是现在国内外研究的重点, 琼东南盆地深水区油气资源丰富<sup>[4-6]</sup>, 盆地 BD21 地区在陵水组三段获得高产油气流<sup>[7]</sup>, 因此, 对于该区域天然气井进行碳同位素研究有着

重要的现实意义。2018 年起, 中海油湛江分公司在琼东南盆地松涛凸起开始应用甲烷碳同位素录井技术, 进行了气源对比与天然气来源分析<sup>[8]</sup>。然而, 过去的工作主要针对甲烷碳同位素进行, 没有乙烷碳同位素与丙烷碳同位素的数据, 而两者对碳同位素的成因研究更为重要。本文采用多组分碳同位素录井技术, 以琼东南盆地东部某天然气井(A 井)为例, 进行了全井甲烷碳同位素、乙烷碳同位素与丙烷碳同位素测量, 获取了该井多组分碳同位素数据, 结合周边井重点层位的碳同位素数据, 对 BD21-1 区块天然气来源与成藏特征进行了探讨。

## 1 方法与数据

在传统的碳同位素应用中, 受限于质谱单体同位素测量仪器 GC-IRMS 价格昂贵, 在现场维护困难, 主要采用现场取样+实验室质谱分析的工作模式, 这极大地限制了碳同位素对油气勘探的

收稿日期: 2022-04-01; 修回日期: 2023-07-17

基金项目: 中国海洋石油集团公司重大专项课题“双孔介质储层测录井综合评价技术与作业方案优化研究”(YXKY-2021-ZJ-01)

第一作者: 胡益涛(1984-), 男, 工程师, 2008 年毕业于长江大学地球物理学院, 硕士, 主要从事录井科研和生产管理工作。Email: huyt@cfhg.com

实时评价和指导作用。因而国内外油气工作者尝试开发适用于现场的检测技术,包括 Picaaro 公司的光腔衰荡光谱技术(CRDS)、LGR 公司的积分腔输出光谱技术(ICOS)技术、CSS 公司的小型化质谱技术和冠德公司的量子级联激光器+空心波导技术等<sup>[9-12]</sup>。中法渤海地质服务公司最早在国内引入基于 CRDS 技术的碳同位素分析仪<sup>[13]</sup>,但该技术仅能检测甲烷,且对水较为敏感,对气体的消耗量大,因而在现场的使用中受到诸多限制;随后又在现场尝试使用小型化质谱仪开展碳同位素录井工作,实现了对  $C_1 \sim C_3$  碳同位素的测量,但受限于现场的复杂工况,应用效果不甚理想,小型化质谱仪的稳定性和抗干扰能力仍有待提高。

本文采用中法渤海地质服务有限公司与苏州冠德能源科技有限公司联合研发的 GRAND-3 色谱—红外激光光谱联用测量仪,采用吸收光谱测量烃类气体中的碳同位素。与传统的同位素质谱测量比较,红外激光光谱同位素测量仪具有成本低、体积小、容易搬运的特点。由于不需要在真空条件下检测,也不需要经过复杂的前处理,GRAND-3 能够在钻井现场进行原地实时测量。此外,GRAND-3 测样速度快,4 min 内可以完成  $C_1 \sim C_3$  同位素的测量,测量值误差小于 0.5‰,测量的浓度下限低至 0.05%。

为控制成果数据质量,保障录井设备的稳定性,每个井段都要通过天然气标准样品进行仪器校验,保障设备的可靠性及稳定性,要求天然气标准样品测量标准差小于 0.5(表 1),方满足研究需要。A 井的标准样品校验记录见表 1。

碳同位素录井过程中检测的样品都是泥浆气,泥浆气是钻头破碎地层所释放的烃类气体,它随着泥浆上返至地面,经过脱气器脱出并通过管线导入仪器进样端进行自动检测。泥浆气以破碎气为主,

表 1 BD21-1 区块 A 井碳同位素标准样品校验记录  
Table 1 Verification report of carbon isotope measurement

深度/ m	碳同位素/‰			深度/ m	碳同位素/‰		
	$\delta^{13}C_1$	$\delta^{13}C_2$	$\delta^{13}C_3$		$\delta^{13}C_1$	$\delta^{13}C_2$	$\delta^{13}C_3$
1519	-51.49	-32.27	-31.85	3839	-50.56	-31.50	-31.45
1820	-51.28	-31.93	-31.59	3954	-51.73	-32.36	-32.55
2015	-51.47	-32.23	-32.08	3993	-50.85	-31.68	-31.67
2320	-51.60	-31.96	-32.66	4002	-50.99	-31.49	-31.59
2706	-51.51	-32.30	-32.28	4096	-50.65	-31.77	-31.40
3023	-51.92	-31.81	-32.52	4154	-51.40	-32.47	-31.90
3197	-51.01	-31.70	-32.47	4320	-51.29	-32.17	-31.36
3312.37	-51.60	-32.52	-32.26	4675	-50.76	-31.92	-31.65
3538	-51.83	-32.40	-32.47	4821	-50.89	-32.10	-32.01
3538	-51.58	-32.58	-32.18	4955	-51.20	-31.80	-32.11
3546	-50.99	-31.94	-31.87	5115	-50.75	-32.15	-31.60
3546	-50.70	-31.53	-31.53	三开 校验	-51.20	-32.20	-32.43
3550	-50.41	-31.62	-31.41	四开 校验	-50.99	-31.80	-31.90
3638	-50.91	-31.78	-31.60	标准差	0.41	0.38	0.40

并存在部分井壁及岩屑释放气,能够反映钻遇地层蕴藏的天然气特征信息。

A 井碳同位素录井段自 1 519~5 115 m 完钻,涵盖黄流组、梅山组、三亚组、陵水组、崖城组地层。采样间隔为每 4 min 得到一组数据,共取得甲烷、乙烷、丙烷碳同位素数据 2 424 组。

## 2 地质背景

琼东南盆地深水区是深水天然气增储上产的主力区<sup>[4]</sup>,在西区的黄流组与莺歌海组有大气田,在东区梅山组、陵水组、崖城组发育有多个含气构造。A 井位于琼东南盆地宝岛凹陷北部断阶带。

宝岛凹陷位于南海北部琼东南盆地深水区的东部,北部为神狐隆起,南部为松南低凸起,西部为松涛凹陷(图 1)。自下而上发育有始新统湖相沉积,

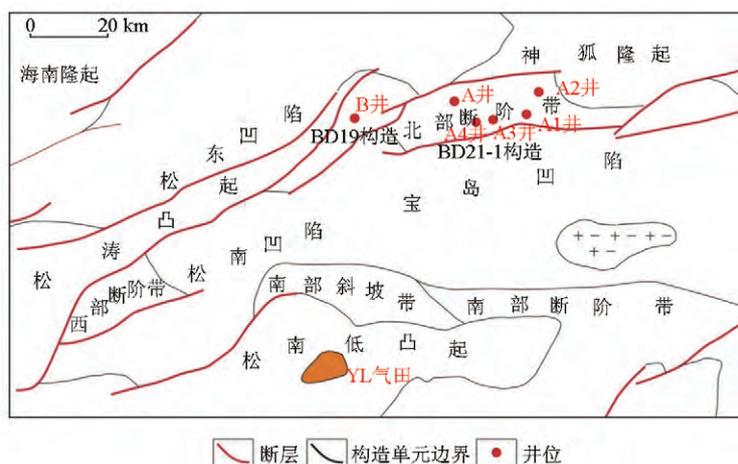


图 1 琼东南盆地天然气探井位置

Fig.1 Well location in Qiongdongnan Basin

渐新统崖城组、陵水组与下中新统三亚组海陆过渡相—滨海相,中新统梅山组之上的滨浅海至深海相沉积<sup>[13-14]</sup>。

区域性储层主要为陵水组三段、崖城组发育的大型三角洲砂岩储集体,与上覆浅海泥岩形成有利储、盖组合。根据实际勘探需要,依照沉积相带将陵水组三段至崖城组的砂层发育段划分为3个砂层组,具体砂层划分见图2。

烃源岩主要有3套,分别为始新统湖相泥岩、渐

新统崖城组和陵水组的海相泥岩及中新统三亚组和梅山组的海相泥岩。渐新统崖城组陆源海相烃源岩大部分 TOC 高于 1%,有机质类型以 III 型为主,部分为 II<sub>2</sub> 型,具备近源成熟烃源岩供给的优势<sup>[4]</sup>。

### 3 多组分碳同位素及天然气烃类组分特征

天然气组分差异与碳同位素特征可以反映天然气的成因<sup>[3]</sup>。同位素特征主要与烃源岩母质有关,

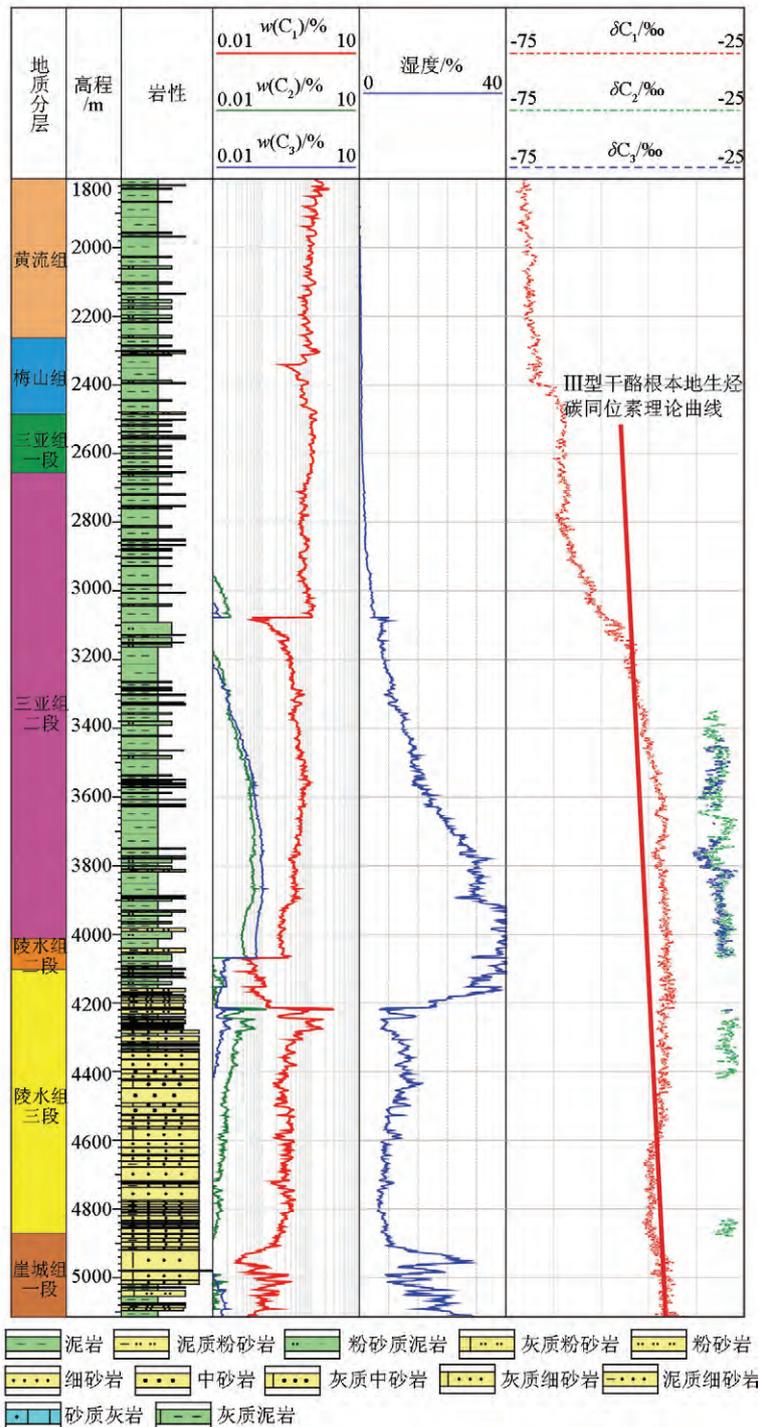


图2 多组分碳同位素剖面  
Fig.2 Multicomponent carbon isotope profiles

另外,成藏过程中的物理、化学、生物等变化引起的同位素分馏,可以对天然气同位素特征产生影响<sup>[15]</sup>。

A 井天然气碳同位素组成自上至下呈现逐渐变重的趋势(图 2)。其中甲烷碳同位素  $\delta^{13}\text{C}_1$  值为  $-72.57\text{‰} \sim -36.56\text{‰}$ , 绝大多数为  $-50\text{‰} \sim -38\text{‰}$ ; 乙烷碳同位素  $\delta^{13}\text{C}_2$  值为  $-35.48\text{‰} \sim -25.94\text{‰}$ , 大多数为  $-33\text{‰} \sim -28\text{‰}$ ; 丙烷碳同位素  $\delta^{13}\text{C}_3$  值为  $-35.92\text{‰} \sim -26.15\text{‰}$ , 多为  $-33\text{‰} \sim -28\text{‰}$ 。甲烷碳同位素  $\delta^{13}\text{C}_1$  较轻,变化区间比较大,而乙烷同位素  $\delta^{13}\text{C}_2$  与丙烷碳同位素  $\delta^{13}\text{C}_3$  两者含量比较相近,比较稳定。不同组分的碳同位素主要呈正序分布,即  $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$ 。

黄流组、梅山组烃类组分主要为甲烷,甲烷碳同位素值自上而下逐渐变重。乙烷与丙烷的含量很低,所以未获得  $\delta^{13}\text{C}_2$  与  $\delta^{13}\text{C}_3$  的数据。 $\delta^{13}\text{C}_1$  分布在  $-72.57\text{‰} \sim -62.46\text{‰}$ (表 2), 组分也较为干燥,湿度小于 1%,属于典型生物成因气特征。该段钻遇天然气主体为本地泥岩所生成的生物成因气。

从三亚组二段开始,甲烷同位素值随深度增加逐渐增大,且变化速率较快, $\delta^{13}\text{C}_1$  从  $-64.87\text{‰}$  变

化至  $-40.23\text{‰}$ , 其后逐渐平稳。乙烷同位素和丙烷同位素比较稳定。 $\delta^{13}\text{C}_2$  主体分布在  $-32.50\text{‰} \sim -28.26\text{‰}$ , 平均为  $-30.25\text{‰}$ ; $\delta^{13}\text{C}_3$  分布在  $-32.62\text{‰} \sim -28.22\text{‰}$ , 平均为  $-30.94\text{‰}$ 。且随着  $\delta^{13}\text{C}_1$  变重,天然气组分也开始显著变湿,至三亚组底部湿度最高可达 40%。

自三亚组下部 3 400 m 至陵水组 4 250 m 碳同位素值较为稳定, $\delta^{13}\text{C}_1$  维持在  $-43.18\text{‰} \sim -40.10\text{‰}$ , 平均为  $-41.46\text{‰}$ ; $\delta^{13}\text{C}_2$  在  $-31.54\text{‰} \sim -28.78\text{‰}$ , 平均  $-29.29\text{‰}$ ; $\delta^{13}\text{C}_3$  在  $-30.97\text{‰} \sim -27.54\text{‰}$ , 平均  $-29.42\text{‰}$ ; 表明该段天然气来源可能较为相近。值得注意的是,在陵水组三段砂岩下部(3 砂层)存在一段  $\delta^{13}\text{C}_1$  偏轻, $\delta^{13}\text{C}_1$  偏移至  $-45.45\text{‰}$ ,表现出明显的来源差异。到崖城组一段  $\delta^{13}\text{C}_1$  则又回归至  $42.00\text{‰}$ 。

天然气组分与碳同位素具有相呼应的变化特征:黄流组与梅山组同位素较轻,其组分极为干燥,至三亚组,碳同位素组成逐渐变重,则组分湿度亦随之增加。陵水组三段粉砂岩,其组分湿度在 7%~11%,砂岩下部甲烷同位素组成偏轻,组分略偏干。崖城组泥岩段湿度在 15%~23%,湿度相对上部砂岩偏大。

表 2 天然气多组分碳同位素特征

Table 2 Multicomponent carbon isotope characteristics of natural gas

层位	碳同位素/‰		
	$\delta^{13}\text{C}_1$	$\delta^{13}\text{C}_2$	$\delta^{13}\text{C}_3$
黄流组	$-72.57 \sim -68.32$ $-70.39(155)$		
梅山组	$-70.42 \sim -62.46$ $-66.98(82)$		
三亚组一段	$-64.69 \sim -62.19$ $-63.15(69)$		
三亚组二段	$-64.87 \sim -40.23$ $-49.55(948)$	$-35.48 \sim -26.37$ $-30.25(449)$	$-35.92 \sim -26.15$ $-30.94(282)$
陵水组二段	$-43.18 \sim -39.97$ $-41.46(62)$	$-31.54 \sim -26.78$ $-29.29(42)$	$-30.97 \sim -27.54$ $-29.42(35)$
陵水组三段	$-46.26 \sim -39.00$ $-43.05(621)$	$-32.02 \sim -25.94$ $-28.31(154)$	$-29.29 \sim -26.89$ $-28.14(5)$
崖城组	$-45.45 \sim -36.56$ $-42.00(398)$	$-30.99 \sim -27.19$ $-28.70(7)$	

注: 最小值~最大值  
平均值(样品数)

#### 4 天然气成因类型

天然气组分、稳定碳同位素特征与成气母质的沉积环境、有机质类型及热演化程度密切相关,经常被用来判断天然气的成因类型及来源<sup>[13-16]</sup>。根据同位素与组分特征可将钻遇的天然气大致分为 3

类:生物气、亚生物气、热成因气<sup>[17-18]</sup>。三亚组一段以上  $\text{C}_1/\text{C}_{2+3}$  大于 130, $\delta^{13}\text{C}_1$  轻于  $-55\text{‰}$ ,为生物气和亚生物气;三亚组二段及以下主体小于 100, $\delta^{13}\text{C}_1$  重于  $-55\text{‰}$ ,主体为热成因气(图 3)。

泥浆气是钻遇地层气体释放效应的合集,以钻头最新破碎地层释放气体为主,经过深度校正,对随钻泥浆气的监测实际上反映了钻遇地层蕴含气体的

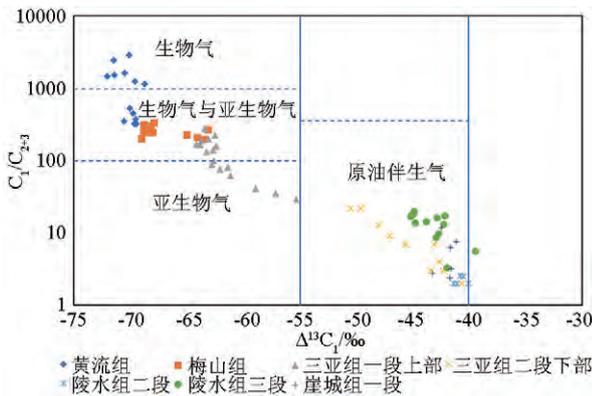


图3 A井钻遇天然气成因判别

Fig.3 Natural gas origin identification of well A

碳同位素信息。由于碳同位素值与气体成因息息相关，因此油气的运聚成藏信息能够直观地表现在碳同位素剖面上。为了方便对比分析，绘制本地生烃碳同位素理论曲线，黄流组至三亚组有机质类型以腐殖型干酪根为主，结合前人研究的  $R_0-\delta^{13}C$  关系，模拟了不同埋深情况下钻遇泥岩热降解生烃的碳同位素值(图2中实线)作为参考。可以看出，自三亚组二段中部至陵水组顶部，其  $\delta^{13}C_1$  都要重于本地生烃理论曲线，表明天然气演化程度更高，来自更深处烃源岩。三亚组二段上部同位素快速变化段，其变化趋势要明显快于埋深主导的本地生烃理论曲线，该段实际上属于生物成因气与热成因气的过渡段，越靠下，热成因气占比越高，这种混合导致了同位素的快速变化。陵水组三段粉砂岩是本井主要的勘探目标，但是该段砂岩上下碳同位素值存在明显

的差别，这表明该砂岩纵向上并不是完全连通的。3砂层碳同位素甚至轻于基于Ⅲ干酪根所计算的本地生烃理论曲线，并且这一特征并不是孤例，BD21地区其他井在陵水组三段下部也见到该特征，可以在区域整体上进行对比分析。

### 5 区域成藏特征

整个松涛—宝岛地区天然气来源多样：基于前人研究，靠近BD21-I区块的BD19区块B井在陵水组钻遇天然气  $\delta^{13}C_2$  在  $-30\text{‰}$ ， $\delta^{13}C_1$  在  $-35\text{‰}$ ，认为是高熟油型气，该类气甲烷碳同位素偏重，乙烷碳同位素偏轻，组分偏湿(干燥系数  $< 0.9$ )，其来源为始新统湖相烃源岩<sup>[19-20]</sup>；而以陵水气田为代表的崖城组天然气  $\delta^{13}C_2$  都重于  $-25\text{‰}$ ， $\delta^{13}C_1$  随着演化程度的不同存在一定程度的变化；在该地区同时存在一种特殊成因气，以松南低凸YL气体及松涛凸起所见气为代表，该类气  $\delta^{13}C_1$  轻于  $-42\text{‰}$ ，且干燥系数大于 0.95。曾有学者专门针对该类天然气成因做过分析，认为该类气最大可能是崖城组偏腐殖型烃源岩在低熟条件下产生的特殊成因气，其同位素偏轻，但是组分则偏干，不同于一般的生烃演化特征<sup>[21]</sup>。

BD21地区进行了5口井的碳同位素分析工作，将陵水组三段不同砂层组的天然气碳同位素与组分特征对比分析(图4、图5)，可以发现BD21地区存在两类来源的天然气：A2井崖城组砂岩气以高成

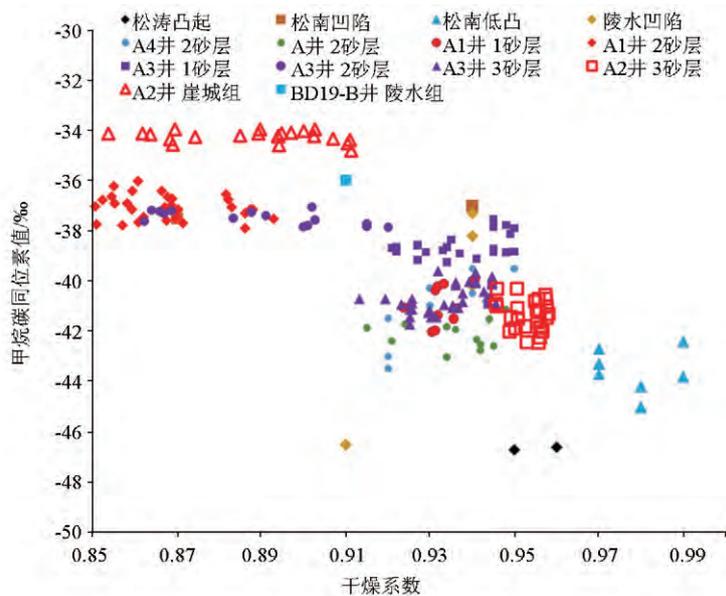
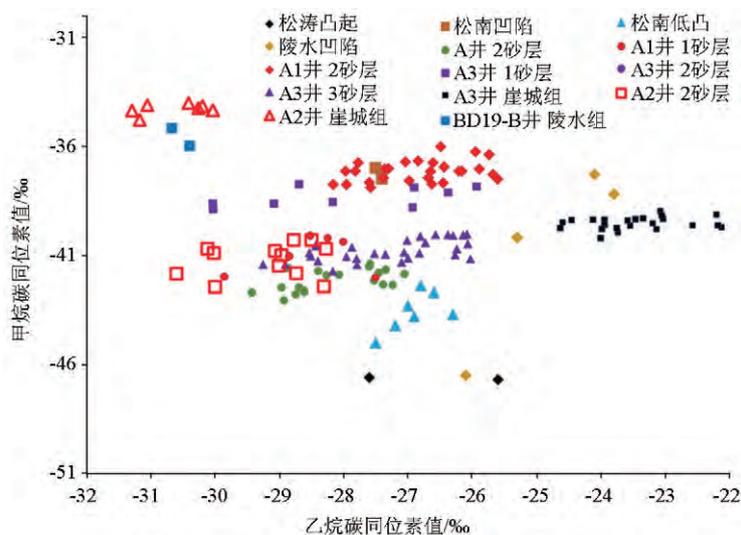


图4 BD21构造及周边井储层  $\delta^{13}C_1$ —干燥系数特征(松涛凸起、松南凹陷、松南低凸、陵水凹陷碳同位素及组分数据取自生产天然气，数据引自文献[7]、[8]、[13]、[21]；其他数据来自同位素录井，皆为随钻泥浆气碳同位素数据。图5同)

Fig.4  $\delta^{13}C_1$ -drying values of multi-well reservoir in fault in BD21( The carbon isotope and component data of Songtao bulge , Songnan Sag , Songnan low bulge and Lingshui sag were obtained from natural gas production , and the data were cited from references [7] , [8] , [13] , [21]. Other data are derived from isotopic logging and are all carbon isotope data of mud gas while drilling. Same as in Fig.5)

图5 BD21 构造及周边井储层  $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$  特征Fig.5  $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$  values of multi-well reservoir in BD21

熟度油型气充注为主要特征,在 A1 井 2 砂层和 A3 井 2 砂层亦可见高成熟度油性气充注特征,该类气特征与 BD19 区块在陵水组钻遇的天然气特征较为相近,应该同样来自于始新统湖相烃源岩高成熟阶段的产物。另一类气体则代表了该区域大多数情况,甲烷碳同位素在  $-39\text{‰} \sim -42\text{‰}$ ,乙烷碳同位素在  $-26\text{‰} \sim -29\text{‰}$ ,干燥系数在  $0.92 \sim 0.96$ 。该类气明显区别于始新统高熟油型气,也明显区别于陵水气田的高成熟崖城组煤型气,相对于松南低凸 YL 气田的特殊成因低熟气其碳同位素略重,组分略湿。综合判断,认为最大可能为特殊成因低熟气和始新统高熟油型气混合的结果。

从 A 井碳同位素连续剖面上来看,陵水组三段下部 3 砂层组同位素变轻、组分偏干段应该是特殊成因低熟气充注比较集中的区域。从目前的勘探成果来看,气测与试气结果比较好的层段都表现出偏特殊成因低熟气的特征,而始新统高熟油型气分布层位则比较广泛。因此下一步勘探中应落实前者具体的分布规律,而后者则需论证是否有高丰度聚集的可能性。

## 6 结论

1) 通过连续碳同位素检测,可以判断 A 井在黄流组、梅山组和三亚组一段钻遇天然气为本地泥岩的生物成因气,三亚组二段上部为生物成因气与热成因气的过渡段,三亚组二段下部至崖城组则为更

深层来源的成熟度偏高的热成因气。

2) BD21 地区存在两类成因的天然气,始新统高熟油型气和特殊成因的低熟气煤型气,其中气测与试气结果比较好的层段都表现出偏特殊成因低熟气的特征,而始新统高熟油型气分布层位则比较广泛。前者是目前勘探的主要目标,后者则具有潜在规模。

3) 通过连续碳同位素分析,在一般成因分析基础上,能够基于不同层位碳同位素的细微特征和纵向上的变化趋势,分析不同地层天然气的成因差别,以及主力气体的充注层位与充注范围,为天然气成藏研究提供更多参考资料。

## 参考文献(References):

- [1] Cesar J, Mayer B, Deblonde C, et al. Alternative indicators to assess the distribution characteristics of methane, ethane, and propane derived from petroleum in the Montney Formation, Western Canada [J]. Fuel, 2021, 294(15): 1-14.
  - [2] Ellis L, Berkman T, Uchytel S, et al. Integration of mud gas isotope logging (MGIL) with field appraisal at Horn Mountain Field, deepwater Gulf of Mexico [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 58(3): 443-463.
  - [3] 慈兴华, 张焕旭, 牛强, 等. 碳同位素现场检测技术分析致密油气充注特征——以渤海湾盆地民丰洼陷北斜坡为例 [J]. 天然气工业, 2019, 39(11): 10-17.
- Gi X H, Zhang H X, Niu Q, et al. Analysis of tight oil and gas charging characteristics by the carbon isotope field detection technology: A case study of the northern slope of the Minfeng sub-sag in the Bohai Bay Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(11): 10-17.

- [4] 谢玉洪.中国海洋石油总公司油气勘探新进展及展望[J].中国石油勘探,2018,23(1):26-35.  
Xie Y H.New progress and prospect of oil and gas exploration of China National Offshore Oil Corporation [J].China Petroleum Exploration 2018,23(1):26-35.
- [5] 王振峰,孙志鹏,朱继田,等.南海西部深水天然气地质与大气田重大发现[J].天然气工业,2015,35(10):11-20.  
Wang Z F,Sun Z P,Zhu J T,et al.Natural gas geological characteristics and great discovery of large gas fields in deep water area of the western South China Sea [J].Natural Gas Industry,2015,35(10):11-20.
- [6] 施和生,杨计海,张迎朝,等.琼东南盆地地质认识创新与深水领域天然气勘探重大突破[J].中国石油勘探,2019,24(6):691-698.  
Shi H S,Yang J H,Zhang Y Z,et al.Geological understanding innovation and major breakthrough to natural gas exploration in deep water in Qiongdongnan Basin [J].China Petroleum Exploration,2019,24(6):691-698.
- [7] 郭书生,廖高龙,梁豪,等.琼东南盆地 BD21 井深水天然气勘探重大突破及意义[J].中国石油勘探,2021,26(5):49-59.  
Guo S S,Liao G L,Liang H,et al.Major breakthrough and significance of deep-water gas exploration in Well BD21 in Qiongdongnan Basin [J].China Petroleum Exploration,2021,26(5):49-59.
- [8] 梁刚,甘军,游君君,等.琼东南盆地低熟煤型气地球化学特征及勘探前景[J].天然气地球科学,2020,31(7):895-903.  
Liang G,Gan J,You J J,et al.Geochemical characteristics and exploration prospect of low mature coal-derived gas in Qiongdongnan Basin [J].Natural Gas Geoscience,2020,31(7):895-903.
- [9] 石晓,刘汉彬,张佳,等.激光光谱技术在稳定同位素组成分析中的应用现状[J].世界核地质科学,2016,33(4):237-243.  
Shi X,Liu H B,Zhang J,et al.Laser spectrometry for stable isotope analysis and its application status [J].World Nuclear Geoscience,2016,33(4):237-243.
- [10] 牛强,瞿煜扬,慈兴华,等.碳同位素录井技术发展现状及展望[J].录井工程,2019,30(3):8-15,184.  
Niu Q,Qu Y Y,Ci X H,et al.Development status and prospect of carbon isotope logging technology [J].Mud Logging Engineering,2019,30(3):8-15,184.
- [11] 宋祥,魏兵.Isologger 气体同位素录井仪[J].录井工程,2017,28(2):95-98,137.  
Song X,Wei B.Isologger gas isotope logger [J].Mud Logging Engineering,28(2):95-98,137.
- [12] 耿恒,陈沛,陈鸣.实时甲烷碳同位素录井在南海西部 YC1-1-1 井的应用[J].录井工程,2016,27(4):45-48,93-94.  
Geng H,Chen P,Chen M.Application of real-time methane carbon isotope logging in YC1-1-1 well in the west of the South China Sea [J].Mud Logging Engineering,2016,27(4):45-48,93-94.
- [13] 张迎朝,甘军,徐新德,等.琼东南盆地深水东区 Y8-1 含气构造天然气来源及侧向运聚模式[J].地球科学,2019,44(8):2609-2618.  
Zhang Y Z,Gan J,Xu X D,et al.The source and natural gas lateral migration accumulation model of Y8-1 gas bearing structure, east deep water in the Qiongdongnan basin [J].Earth Science,2019,44(8):2609-2618.
- [14] 张迎朝,徐新德,甘军,等.琼东南盆地深水大气田地质特征、成藏模式及勘探方向研究[J].地质学报,2017,91(7):1620-1633.  
Zhang Y Z,Xu X D,Gan J,et al.Study on the geological characteristics, accumulation model and exploration direction of the giant deepwater gas field in the Qiongdongnan basin [J].Acta Geologica Sinica,2017,91(7):1620-1633.
- [15] 陈建平,王绪龙,倪云燕,等.准噶尔盆地南缘天然气成因类型与气源[J].石油勘探与开发,2019,46(3):461-473.  
Chen J P,Wang X L,Ni Y Y,et al.Genetic type and source of natural gas in the southern margin of Junggar Basin, NW China [J].Petroleum and Development,2019,46(3):461-473.
- [16] 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.  
Dai J X.Identification of various genetic natural gases [J].China Offshore Oil & Gas,1992,6(1):11-19.
- [17] 戴金星.各类烷烃气的鉴别[J].中国科学: B 辑,1992,2:185-193.  
Dai J X.Identification of various alkane gas [J].Scientia Sinica: B,1992,2:185-193.
- [18] 戴金星.煤成气及鉴别理论研究进展[J].科学通报,2018,63(14):1291-1305.  
Dai J X.Coal-derived gas theory and its discrimination [J].Chinese Science Bulletin,2018,63(14):1291-1305.
- [19] 梁刚,甘军,徐新德,等.实时碳同位素录井技术在琼东南盆地松涛凸起天然气成因及成藏分析中的应用[J].中国海上油气,2018,30(3):56-61.  
Liang G,Gan J,Xu X D,et al.Application of real-time carbon isotope logging technology in genesis and reservoir formation of natural gas in Songtao uplift, Qiongdongnan basin [J].China Offshore Oil and Gas,2018,30(3):56-61.
- [20] 刘妍鞞,陈红汉,苏奥,等.从含油气检测来洞悉琼东南盆地东部发育始新统烃源岩的可能性[J].地球科学,2016,41(9):1539-1547.  
Liu Y H,Chen H H,Su A,et al.Eocene source rock determination in Qiongdongnan Basin, the south Chian Sea: A hydrocarbon detection perspective [J].Earth Science,2016,41(9):1539-1547.
- [21] 梁刚,甘军,游君君,等.琼东南盆地低熟煤型气地球化学特征及勘探前景[J].天然气地球科学,2020,31(7):895-903.  
Liang G,Gan J,You J J,et al.Geochemical characteristics and exploration prospect of low mature coal-derived gas in Qiongdongnan Basin [J].Natural Gas Geoscience,2020,31(7):895-903.

## Application of multi-component carbon isotope logging in natural gas exploration: A case study of the BD21 area , Qiongdongnan Basin

HU Yi-Tao<sup>1</sup> , ZHANG Huan-Xu<sup>2</sup> , NI Peng-Bo<sup>3</sup> , HAO Wei<sup>3</sup> , QU Yu-Yang<sup>2</sup> , XIAO Han-Li<sup>2</sup>

( 1. Zhanjiang Branch , China France Bohai Geoservices Co. , Ltd. , Zhanjiang 524057 , China; 2. Suzhou Grand Energy Technology Co. Ltd. , Suzhou 215129 , China; 3. China France Bohai Geoservices Co. , Ltd. , Tianjin 300450 , China)

**Abstract:** This study aims to ascertain the accumulation characteristics of natural gas in the deep-water oil and gas fields in the Qiongdongnan Basin. To this end , it performed continuous multi-component carbon isotope measurements for natural gas wells in the basin. Based on the comparative analysis of a continuous carbon isotope profile from a key well in the basin and the carbon isotope values from key intervals in surrounding wells , this study delved into the genetic types and sources of natural gas in the key well. The results show that dry gas occurs above the first member of the Sanya Formation , dominated by biogenic and secondary biogenic gases. In contrast , wet thermogenic gas exists below the second member of the formation , primarily including associated gas. Besides , natural gas in the BD21-1 block originates from two sources: Eocene high-maturity oil-formed gas and low-maturity gas with a special genesis from the Yacheng Formation. Overall , multi-component carbon isotope logging is effective in investigating the genetic types , sources , and maturity of natural gas.

**Key words:** Qiongdongnan Basin; carbon isotope log; genetic type; Yacheng Formation

( 本文编辑: 蒋实)