

南海北部边缘盆地天然气成因类型 及气源构成特点

何家雄¹ 姚永坚² 刘海龄¹ 万志峰¹

(1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

提要:南海北部边缘盆地油气地质现象丰富多彩, 天然气成因类型及分布规律复杂。根据该区天然气勘探及研究程度, 迄今为止勘探所发现烃类天然气可划分为生物气及生物-低熟过渡带气(亚生物气)、成熟-高熟油型气及煤型气以及高熟-过熟天然气等 3 大成因类型; 非烃天然气 CO₂ 可划分为壳源型(有机/无机)、壳幔混合型及幔源型等 3 型 4 类。生物气及亚生物气在莺-琼盆地及珠江口盆地浅层广泛分布, 气源来自上新统及第四系海相沉积; 成熟油型气主要分布于北部湾、琼东南东北部及珠江口盆地, 气源来自始新统中深湖相偏腐泥型烃源岩; 成熟-高熟煤型气及高熟-过熟天然气, 则主要展布于莺-琼盆地及珠江口盆地部分地区, 前者气源主要由渐新统煤系和中新统海相偏腐殖型烃源岩所供给, 后者气源则来自不同类型高熟-过熟烃源岩。CO₂ 则主要富集于莺歌海盆地泥底辟带浅层及琼东南盆地东部和珠江口盆地部分区域, 气源分别来自受泥底辟热流体活动影响强烈的中新统海相含钙砂泥岩和深部地幔活动。

关键词:南海北部; 生物气; 成熟油型气; 成熟-高熟煤型气; CO₂ 成因类型; 气源构成特点

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)05-1007-10

南海北部边缘盆地处在欧亚板块、印度-澳大利亚板块及太平洋板块等三大板块交汇处之特殊大地构造位置, 亦是古特提斯构造域与古太平洋构造域的混合叠置区, 故区域地质背景复杂、盆地形成演化颇具特色、古-新近系沉积及烃源岩发育(既有巨厚海相坳陷沉积的中新统烃源岩亦有分布广泛的古近系中深湖相烃源岩及渐新统煤系烃源岩)、油气地质现象及运聚成藏规律独特、油气成因类型多, 尤其是天然气成因类型多, 且自浅而深、自上而下由生物气及亚生物气、热成因成熟油型气、成熟-高熟煤型气及高熟-过熟天然气等构成了复杂的天然气运聚分布体系。这即是该区最基本的区域构造地质背景和油气地质特点。

南海北部边缘盆地油气勘探活动虽然历经半个多世纪, 但多年来均主要集中在北部湾、莺歌海、琼东南、珠江口及台西南等 5 大盆地的陆架浅水区

古-新近系, 而广大的陆坡深水区基本未涉及或涉足甚少^[1-3]。目前, 南海北部边缘盆地陆架浅水区总体油气勘探程度仍然较低, 油气勘探领域及范围, 主要集中在北部湾盆地涠西南凹陷东部及周缘、莺歌海盆地泥底辟带浅层及莺东斜坡带中南段、琼东南盆地西部环崖南凹陷构造带以及东部松南-宝岛凹陷周缘区、珠江口盆地西部文昌凹陷及周缘和神狐隆起、珠江口盆地东部珠一坳陷及周缘和珠二坳陷白云北坡-番禺低隆起周缘等地区, 而其他区域的油气勘探程度尚低, 勘探及研究工作甚少。虽然半个世纪以来, 南海北部边缘盆地陆架浅水区油气勘探已获重大突破和长足进展, 陆续勘探发现了多个大中型油气田, 基本形成了南海北部油气大区的基本格局, 但迄今为止该区整体油气勘探程度并不太高, 很多油气地质规律及特点尚有待进一步深化认识。本文旨在前人研究及近期所获油气勘探成果与地质

收稿日期: 2008-03-19; 改回日期: 2008-05-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB41170501)与中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-203-2)联合资助。

作者简介: 何家雄, 男, 1956 年生, 研究员, 博士, 长期从事油气勘探与地质综合研究; E-mail: hejx@gig.ac.cn。

资料的基础上,重点对南海北部边缘盆地油气勘探中所发现的烃类天然气及非烃气成因类型及其气源构成特点与运聚分布特征,进行深入地分析探讨,以期对该区油气勘探部署决策及油气地质规律的认识与油气地质综合研究等有所帮助。

1 天然气成因类型及分布特点

南海北部边缘盆地是中国东南近海重要的油气富集区和油气产区,亦是中海油石油总公司(中海油)油气资源勘探开发与研究的重点和热点地区。该区不仅油气资源较丰富,而且油气成藏地质条件、油气源及天然气成因类型与运聚规律等均较复杂^[5-10]。目前世界上已知最典型富含非生物壳源型 CO₂ 资源且潜力颇大的莺歌海盆地即在该区域。迄今为止,莺歌海盆地浅层(310~1360 m)预测烃类天然气资源量已达万亿 m³,而 CO₂ 资源量则已超过万亿 m³[11-12]。

南海北部边缘盆地大量勘探成果与油气地质地化综合研究表明^[13-24],迄今为止该区勘探所发现的

天然气成因类型较多,且分布广泛气源复杂,但根据形成天然气的外部地质营力及本身的地质地球化学特征,总体上可将该区烃类天然气划分为生物气及生物-低熟过渡带气(亚生物气)、热成因正常成熟-高熟天然气(成熟油型伴生气和成熟-高熟煤型气)和高熟-过熟天然气等3大成因类型(表1),且不同成因类型天然气均具有不同的运聚分布规律和成藏组合特征,以下仅对不同成因类型烃类天然气和 CO₂ 等非烃气及其分布特点进行分析探讨。

1.1 生物气及亚生物气

生物气即在有机质成熟生烃门限以上由生物化学作用所形成的天然气。生物气在南海北部莺-琼盆地^①及珠江口盆地东部白云凹陷北坡-番禺低隆起浅层均有发现。其常见于现场录井的浅层气测异常显示,产于第四系—上新统海相粉细砂岩中,且多以水溶气形式产出,但在莺歌海盆地泥底辟带超浅层的 LD28-1 构造和 LD22-1 浅层构造地震模糊区,第四系乐东组一段已发现单独成藏的生物气藏,

表 1 南海北部边缘盆地烃类天然气地球化学特征及其成因类型与成熟度判别
Table 1 Geochemical characteristics, genetic types and maturity discrimination of natural gas in marginal basins of the northern South China Sea

| 天然气成因类型 | 地区 | 代表井 | 层位 | 深度(m) | 天然气组成(%) | | | | 干燥系数 | 碳同位素 δ ¹³ C(PDB‰) | | 成熟度(Rc%) | |
|----------|---------------|----------|-----------|---------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------|------------------------------|----------------|-----------|------|
| | | | | | C ₁ | C ₂ | CO ₂ | N ₂ | | C ₁ | C ₂ | | |
| 生物成因气 | 生物气 | LD28-1/2 | Q | 560-562.0 | 96.02 | 0.34 | 0.01 | 3.63 | 0.996 | -65.57 | | 0.33 | |
| | | YC13-1/8 | Q | 1402-1670.3 | 89.19 | 0.06 | 1.10 | 9.65 | 0.99 | -76.6~-87.0 | | 0.22 | |
| | | BD19-2/1 | Nm | 2430-2439.5 | 14.31 | 0.14 | 4.78 | 80.80 | 0.99 | -63.5~-63.7 | | 0.35 | |
| | 生物-低熟过渡带气 | 珠江口盆地东部 | PY30-1/1 | Nyh | 790-820 | 91.50 | 2.83 | | | 0.97 | -61.00 | | 0.39 |
| | | | LH19-1/1 | Nhj | 1740-1770 | 92.20 | 0.38 | 0.15 | 5.60 | 0.99 | -55.60 | | 0.48 |
| | | | PY34-1/1 | Nyh | 480-510 | 93.20 | 0.50 | | | 0.99 | -68.2 | | 0.29 |
| 成熟-高熟天然气 | 成熟油型气(原油伴生气) | YC13-1/1 | Nh | 3302.2-3318 | 486.50 | 10.94 | 0.07 | 2.49 | 0.89 | -52.7 | | 0.53 | |
| | | BD19-2/1 | Nm | 2440.0 | 15.14 | 7.00 | 3.15 | 74.71 | 0.96 | -51.70 | | 0.55 | |
| | | LH19-1/1 | Nzhj | 1980-2010 | 90.10 | 6.10 | 0.03 | 3.50 | 0.94 | -53.5 | | 0.52 | |
| | 成熟-高熟煤型气(煤系气) | 珠江口盆地东部 | PY29-1/1A | Nhj | 1160-1190 | 93.60 | 4.50 | 0.01 | 1.50 | 0.96 | -52.5 | | 0.53 |
| | | | BD19-2/2 | Els | 5127.6 | 87.92 | 1.50 | 9.84 | 0.74 | 0.93 | -38.8 | -28.70 | 0.91 |
| | | | ST24-1/1 | Ns | 2122.5 | 76.51 | 10.14 | 8.04 | 4.66 | 0.88 | -47.06 | -30.92 | 0.66 |
| 高熟过熟天然气 | 北部湾盆地 | WZ12-1/2 | Ewz | 2803-2835.4 | 61.51 | 28.16 | 7.38 | 2.24 | 0.69 | -47.44 | -31.22 | 0.65 | |
| | | WZ6-1/1 | C | 1930-1963 | 77.70 | 19.18 | 2.48 | 0.17 | 0.80 | -42.95 | -27.50 | 0.77 | |
| | | WC19-1/1 | Ezh | 1700-1712 | 70.25 | 15.76 | 12.19 | 1.80 | 0.82 | -40.00 | -27.70 | 0.87 | |
| | 莺-琼盆地 | WC13-1-1 | Nzhj | 1465-1473 | 66.09 | 14.55 | 9.52 | 9.84 | 0.82 | -40.01 | -29.70 | 0.87 | |
| | | PY34-1/1 | Nhj | 2370-2400 | 81.20 | 15.80 | 0.06 | 2.80 | 0.83 | -46.5 | | 0.68 | |
| | | YC13-1 | Els | 3573.8-3938.0 | 83.0-88.9 | 1.0-9.0 | 0.17-11.5 | 0.1-1.8 | 0.91-0.98 | -34.7~-39.9 | -24.4~-26.5 | 1.06/0.87 | |
| 珠江口盆地东部 | YC13-4/1 | Ns | 2772.0 | 87.43 | 7.79 | 5.21 | 0.57 | 0.92 | -37.30 | -27.40 | 0.96 | | |
| | YC21-1/4 | Els | 4960.0 | 88.11 | 2.77 | 0.32 | 8.69 | 0.97 | -40.6~-41.9 | -18.74~23.6 | 0.85/0.81 | | |
| | PY30-1/1 | Nhj | 1728.7 | 87.70 | 6.11 | 4.33 | 1.57 | 0.93 | -36.09 | -25.61 | 1.01 | | |
| 莺歌海盆地 | PY34-1/1 | Nzhj | 3612-3633 | 79.36 | 5.62 | 2.89 | 11.77 | 0.93 | -34.60 | -27.70 | 1.06 | | |
| | LH19-5/1 | Nzhj | 2511.5 | 88.12 | 6.97 | 0.56 | 4.35 | 0.93 | -34.30 | -28.10 | 1.08 | | |
| | LD22-1/1 | Nygh | 14861510 | 13.44 | 0.85 | 80.42 | 5.29 | 0.97 | -26.92 | -21.97 | 1.43 | | |
| 珠江口盆地 | LD8-1-5 | Nygh | 1245-1264 | 35.22 | 1.12 | 59.74 | 3.92 | 0.94 | -29.10 | -23.60 | 1.31 | | |
| | PY29-1/1A | Nhj | 2836.2 | 73.5 | 6.21 | 16.1 | 3.92 | 0.93 | -24.97 | -25.85 | 1.54 | | |
| | PY34-1/1 | Nzhj | 3629.0 | 79.48 | 5.36 | 11.95 | 2.91 | 0.94 | -33.90 | -27.70 | 1.09 | | |

注:天然气成熟度根据沈平等(1998)建立的南海北部煤型气成熟度^{δ13C1}=60.21logRc-36.24 计算;珠江口盆地数据引自参考文献[20-22]。

①莺歌海盆地和琼东南盆地的简称。

且产量较高,表明该区存在较大的生物气资源潜力。生物气组成中几乎全是甲烷,不含或仅微含少量 C_2 重烃气($<0.5\%$),干燥系数大(0.99~1.00),属典型干气。非烃气含量较低(4%~12%),且以 N_2 气为主, CO_2 含量甚微,甲烷的 $\delta^{13}C$ 值分布在 -62‰ ~ -87‰ ,属典型生物气碳同位素特征。生物气在南海北部边缘盆地分布普遍,尤以莺—琼盆地及珠江口盆地东部白云凹陷北坡—番禺低隆起等区域生物气最富集,且具有一定的储量和产能,其单井最高日产可达 $45 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上。

生物—低熟(热催化)过渡带气即亚生物气,是介于生物气和低熟热成因气之间的过渡类型气体^[25,26],即处于未熟—低熟过渡带所形成的天然气。该类气以生物气为主,亦有早期低温热催化作用所生成低熟气混入而形成的一种混合气,或低熟阶段(R_o 为 0.3%~0.7%)即热催化作用尚未达大量成油阶段,由有机质缩合、有机酸脱羧及粘土矿物等微催化所形成的烃类气。亚生物气在该区亦以水溶气的形式产出,多分布于未成熟—低成熟的热演化过渡带中。目前,单独成藏的亚生物气气藏仅见于莺歌海盆地 DF1-1 气田西块的 8 井及 9 井区上新统莺歌海组二段,LD22-1 气田的 1、4、5 井区莺歌海组一段—第四系乐东组,以及一号断裂带下降盘 LT1-1 含气构造的上中新统黄流组一段海相粉细砂岩的储层和珠江口盆地白云凹陷北坡—番禺低隆起的新统砂岩储层中。其成因均是由生物气与邻近构造中深部的低熟热成因气运聚混合而形成。生物—低熟过渡带气的组成特征与生物气十分相似,其有所不同的是烃类气组成中 C_2 重烃气的含量明显比生物气高,一般在 4%~7%,最高可达 10%以上(YC13-1-1 井上中新统黄流组)。甲烷的 $\delta^{13}C$ 值相对生物气偏重一些,多在 -48‰ ~ -55‰ 。

1.2 热成因正常成熟—高熟天然气

南海北部边缘盆地热成因正常成熟—高熟天然气包括两个亚类,即成熟油型气和成熟—高熟煤型气(表 1)。热成因正常成熟油型气即腐泥型(I型)或偏腐泥混合型(II1型)有机质在热演化成油过程中伴生的天然气。该区成熟油型气,以北部湾盆地涠西南凹陷和珠江口盆地惠州凹陷、西江凹陷、陆丰凹陷、白云凹陷北坡及文昌凹陷和琼东南盆地东北部崖北—松西凹陷及松东—宝岛凹陷周缘区为代表,主要分布于始新统流沙港组三段浅湖相、渐新统涠

洲组河湖相及下渐新统恩平组河沼相和上渐新统珠海组海相及陵水组海陆过渡相、下中新统三亚组及珠江组海相等储集物性好的砂岩储层中,其以大量正常成熟原油伴有少量油型气的产出形式出现。这些地区产出的陆源石蜡型原油及油型伴生气,具有典型的热演化正常成熟油气的地质地球化学特征,且与南海北部边缘盆地古近系中深湖相烃源岩以及中国东部陆相断陷盆地古近系陆源石蜡型原油及油型伴生气的地质地化特征基本一致,均具有正常成熟油气及陆源生物物质广泛输入的典型特征,气源构成具有湖相生源物质的烃源组成特点。从上述这些地区产出的陆源石蜡型原油的甾萜烷生物标志化合物分布图上,可以明显看到表征中深湖相藻类生源的 $C_{30}A$ -甲基甾萜烷非常丰富,而代表陆源高等植物输入物奥利烷亦有一定含量,属于一种偏腐泥(或偏腐殖型)的混合型生源母质类型。陆源石蜡型原油所伴生的油型气或原油伴生气,则具有 C_2 重烃含量高(10.1%~28.2%)、干燥系数低(0.69~0.88)的特点,其组成以烃类气占绝对优势, CO_2 和 N_2 含量较低,属于陆相烃源岩在正常成熟热演化成油过程中所伴生的湿气。另外,该类油型气的 C_6 和 C_7 轻烃组成中,常富含链烷烃(一般在 70%~80%),而芳烃及环烷烃含量较低(20%~30%),充分表征了其富腐泥含类脂型母质的生源构成特点。

目前发现的油型伴生气及陆源石蜡型原油,主要分布于北部湾盆地涠西南凹陷、珠江口盆地文昌凹陷、惠州凹陷、陆丰凹陷、西江凹陷和白云凹陷北坡及其周缘区、琼东南盆地北部崖北—松西凹陷及东部松东—宝岛凹陷周缘区。其油气运聚及成藏组合系统,主要是通过古近纪—新近纪烃源断层和裂后不整合面及砂体等通道将凹陷深部始新统中深湖相烃源沟通而输送到上覆圈闭和邻近圈闭,最终形成了下生上储或自生自储式的含油气成藏组合类型,且在断裂纵向发育地区尚可在浅部中新统及以上地层中富集成藏^[16,17]。

成熟—高熟煤型气,以琼东南盆地西南部崖南凹陷 YC13-1 气田所产出的大量煤型气及少量煤型凝析油为其典型代表,珠江口盆地西部文昌 A 凹陷及东部白云凹陷北坡—番禺低隆起上亦有该类型煤型气及少量煤型凝析油分布。热成因正常成熟—高熟煤型气,即腐殖型为主的集中型(煤)和分散型有机质(II₂及III型干酪根),在热演化过程中所生成

的煤型气且伴生少量煤型凝析油,是形成南海北部大中型气田的主要烃类气成因类型。南海北部边缘盆地成熟-高熟煤型气,主要产于琼东南盆地崖南凹陷 YC13-1 气田渐新统陵水组三段主力气层的扇三角洲砂岩储层及下中新统三亚组海相砂岩储层、莺歌海盆地泥底辟带浅层上新统莺歌海组海相粉细砂岩储层和珠江口盆地西部文昌 A 凹陷部分含油气构造渐新统珠海组海相砂岩储层,以及珠江口盆地东部白云凹陷北坡—番禺低隆起 LH19-3 及 PY30-1 构造中新统珠江组及韩江组海相砂岩储层。该煤型油气多以大量煤型气为主伴有少量煤型凝析油的产状形式出现,具有热演化正常成熟-高熟煤型油气的地质地球化学特征(表 1),煤型气组成,以甲烷居绝对优势(79%~89%),CO₂ 和 N₂ 等非烃气体含量较低(分别为 0.32%~11.5%和 0.57%~11.7%),干燥系数较大(0.91~0.98),但并非干气,且伴有少量煤型凝析油。煤型气的甲烷、乙烷碳同位素组成明显偏重, $\delta^{13}C_1$ 值主要分布在-34‰~-39.9‰,与国内外煤型气的甲烷碳同位素分布范围(-32‰~-38‰)大体一致,其 $\delta^{13}C_2$ 值为-24.4‰~-27.7‰,均大于-28‰,属典型煤型气的特征^[25]。该煤型气伴生的少量凝析油一般具有高 Pr/Ph、富含芳烃和奥利烷及 W、T 双杜松烷等陆源高等植物输入的典型煤系成因的标志物。该区煤型凝析油气的烃源主要来自琼东南盆地崖南凹陷下渐新统崖城组海岸平原沼泽相煤系及半封闭浅海相泥岩和珠江口盆地渐新统恩平组河流沼泽相煤系以及莺歌海盆地中新统浅海及半深海相富含陆源有机质泥岩,干酪根类型主要以集中型有机质的煤和分散型 II₂ 及 III 腐殖型母质为主,因此其煤系的生源构成及烃源特征均非常明显。

成熟-高熟煤型气,在琼东南盆地主要分布于其西部环崖南凹陷的崖城凸起南缘及 YC13-1 低凸起和崖 21-1 低凸起周缘区,预测在该盆地南部裂陷带乐东、陵水、松南及宝岛诸凹陷的边缘斜坡区亦有煤型油气展布;在莺歌海盆地主要展布于泥底辟带浅层;在珠江口盆地则主要分布于文昌 A 凹陷及周缘区和白云凹陷北坡—番禺低隆起。煤型气产出层位在琼东南盆地和珠江口盆地主要为上渐新统陵水组三段、珠海组和下中新统珠江组,次为中新统三亚—梅山组和下渐新统崖城组二、三段,其纵向分布深度在琼东南盆地崖南凹陷 YC13-1 气田,多在 3580~3950 m,而在崖南凹陷东南区 YC21-1 构造则在

4630~4960 m 的深度范围。在莺歌海盆地煤型气则主要产于上新统莺歌海组及第四系 300~1300 m 的浅层。

1.3 热成因高熟—过熟油气

根据南海北部古-新近系断陷裂谷盆地构造演化及沉积充填特征,结合近年所获长电缆地震资料的地质综合解释,该区大多数盆地均经历了始新世—早渐新世的断陷阶段、晚渐新世的断坳阶段、早—中中新世的坳陷阶段和晚中新世—第四纪热沉降及构造活化阶段等 4 个成盆演化历程,且不同盆地其不同演化阶段沉积充填特征均存在明显差异,在该区部分盆地由于始新世断陷极为发育,沉降幅度大沉积充填巨厚,导致古近系湖相沉积厚度及展布规模巨大,加之其上覆裂后坳陷期的新近系海相沉积较厚,往往使得古近系中深湖相地层被深埋,进而导致古近系烃源岩有机质热演化程度偏高,故能够形成一些高熟-过熟成因类型的油气。比较典型的地区是琼东南盆地南部裂陷带及珠江口盆地东南部白云凹陷和台西南盆地南部坳陷,由于其上覆新近系海相沉积较厚,而其下的古近系断陷规模及沉降幅度更大,故在断陷及断坳期沉积了巨厚的始新统中深湖相泥岩和渐新统滨海沼泽相含煤岩系及河流沼泽相煤系等烃源岩,加之埋藏深、古地温场普遍偏高(地温梯度达 4.2℃/100 m 左右),因此,始新统及渐新统中深湖相及煤系烃源岩有机质热演化程度普遍偏高,虽然该区异常高压体系的抑制作用对有机质热演化进程和热演化程度有所推迟和延缓,但其影响非常有限,故该套烃源岩有机质热演化程度仍然偏高,其应以生成大量高熟-过熟油气为主,并伴有少量高熟凝析油。因此,依据古近系断陷及新近系坳陷的沉积发育规模及埋藏充填史,以及始新统及渐新统烃源岩的热演化程度等诸因素的综合剖析,预测该区深部存在高熟-过熟成因类型的油气。目前已在莺歌海盆地泥底辟带浅层上新统莺歌海组和珠江口盆地白云凹陷北坡—番禺低隆起中新统珠江组及韩江组勘探发现了这种高熟-过熟天然气(图 1)。

1.4 非烃气成因类型及其分布

南海北部边缘盆地不仅烃类油气成因类型多,而且非烃气非常丰富且成因亦较复杂^[27-30]。迄今为止,该区油气勘探中均陆续发现了大量 CO₂ 和 N₂ 等非烃气,且主要富集于莺—琼盆地和珠江口盆地。CO₂ 成

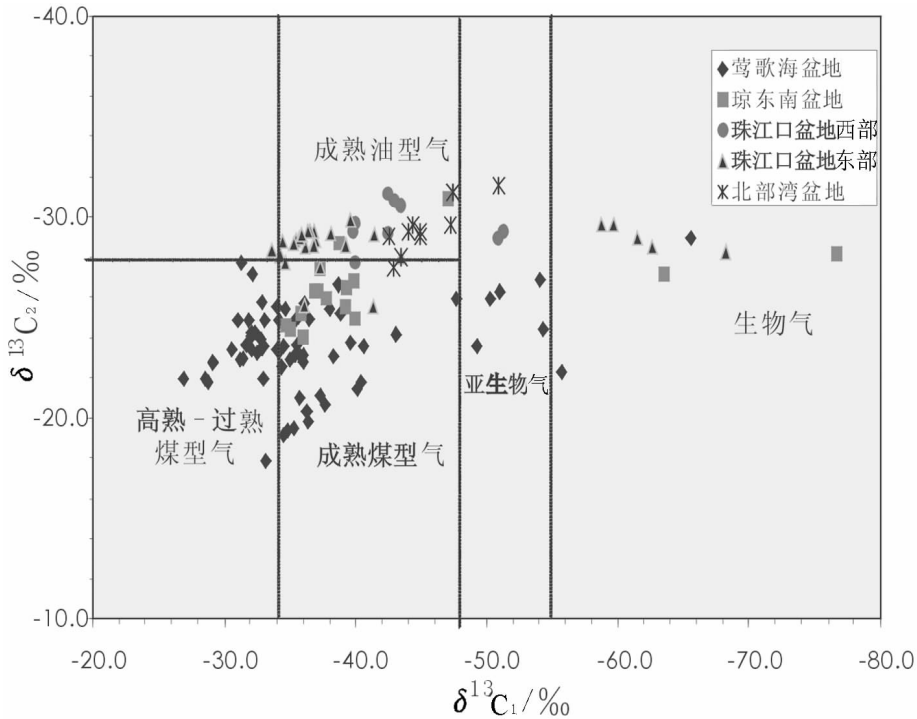


图 1 南海北部边缘盆地烃类天然气成因类型判识与划分

Fig.1 Recognition and classification of genetic types of natural hydrocarbon gas in the northern South China Sea marginal basin

因类型根据通常的成因判识与划分参数 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$) 及标准, 可明确划分为壳源型(有机和无机)、壳幔混合型及火山幔源型等 3 型 4 类 (表 2)。南海北部边缘盆地多以壳源型(无机)和火山幔源型 CO_2 为主, 且形成了颇具规模的 CO_2 气藏。该区非生物壳源型成因 CO_2 主要分布于莺歌海盆地泥底辟带浅层, 且多与烃类气和 N_2 伴生 (CO_2 为 20%~60% 或 >60%)。其地质地球化学特征及最突出的特点是 CO_2 含量高(20%~89%), 且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值偏重(主频为 -2‰ ~ -6‰); 伴生烃类气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值 (-27‰ ~ -34‰) 明显比与有机成因 CO_2 所伴生烃类气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值偏重(一般 $<-35\text{‰}$), 表明与无机 CO_2 伴生的烃类气成熟度普遍要比与有机成因 CO_2 伴生之烃类气的成熟度高; 伴生的氦同位素值 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) 低, R/Ra 比值均小于 0.5。该壳源型 CO_2 储量规模大, 目前所获地质储量近 3000 亿 m^3 , 资源量逾万亿 m^3 以上, 其是迄今世界上所发现的资源潜力最大的壳源型成因 CO_2 。火山幔源型(地幔及火山活动脱气)成因 CO_2 , 主要分布于南海北部边缘琼东南盆地东部 2 号断裂带周缘区及珠江口盆地, 其

最典型最突出的特点是, 氦同位素值 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) 偏高, R/Ra 比值一般均大于 2 以上, 最高达 7.2, CO_2 在天然气组成中含量甚高, 多在 80% 以上(但由于运聚条件之差异, 亦有含量低的), 最高达 99.5%, 且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 亦偏重, 所伴生烃类气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 可偏重或亦可偏轻^[28-29]。

2 天然气成熟度与气源构成特点

南海北部边缘盆地烃类天然气成熟度特征, 根据甲烷(图 1)及同系物碳同位素的成熟度判识结果和地质地球化学综合分析(表 1), 可以将该区天然气划分确定为未熟-低熟阶段 ($\text{R}_o=0.2\%$ ~ 0.7%) 的生物气及亚生物气、成熟-高熟阶段 ($\text{R}_o=0.6\%$ ~ 1.3%) 的油型伴生气及煤型气和高熟-过熟阶段 ($\text{R}_o=1.3\%$ ~ 2.5%) 的天然气等三大类。根据该区烃类天然气成熟度特点, 结合盆地及生烃凹陷天然气成藏地质条件综合分析, 以下将重点对该区烃类天然气的气源构成特征进行深入剖析与探讨。

生物气及亚生物气主要分布于莺-琼盆地及珠江口盆地东部, 其气源构成比较单一, 主要由该区上

表 2 南海北部边缘盆地 CO₂ 气藏及富含 CO₂ 油气藏中 CO₂ 成因类型判识与划分
 Table 2 Discrimination and classification of genetic types of CO₂ in CO₂ reservoirs and CO₂-rich oil/gas reservoirs in marginal basins of the northern South China Sea

| 地区 | 气田 | 代表井 | 层位 | 储层岩性 | 深度(m) | 天然气组成(%) | | | | 碳δ ¹³ C(PDB‰)、氮同位素 | | | CO ₂ 成因类型 |
|---------|---------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------|----------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------|--------------|----------------------|
| | | | | | | CO ₂ | N ₂ | CH ₄ | C ₂ ⁺ | CO ₂ | CH ₄ | R/Ra | |
| 莺歌海盆地 | DF1-1/ III、IV DF1-1S/ II、III | DF1-1/2,3 DF1-1S/2,3 | Ny2 | 粉砂岩 | 1331-1362 | 64.70 | 5.82 | 27.97 | 1.52 | -3.80 | -31.90 | 0.07 | 壳源岩石化学型 |
| | | | | | 1493-1661 | 80.13 | 6.21 | 13.30 | 0.47 | -3.59 | -32.20 | 0.17 | |
| | DF1-1中 | DF1-1-11 | Nh1 | 粉砂岩 | 2785-2799 | 49.52 | 5.24 | 43.11 | 2.13 | -0.65 | -30.08 | 0.03 | |
| | DF29-1/ IV、V | DF29-1-1 | Ny2 | 粉细砂岩 | 1832-1842 | 88.91 | 5.45 | 5.26 | 0.38 | -2.00 | -32.10 | 0.14 | |
| | LD15-1 | LD15-1-1 | Ny1 | 粉细砂岩 | 2200-2225 | 75.17 | 4.17 | 18.70 | 1.99 | -4.15 | -34.54 | 0.26 | |
| | LD20-1 | LD20-1-1 | | | 1471-1490 | 36.57 | 2.80 | 57.56 | 3.09 | -3.47 | -32.04 | | |
| | LD21-1 | LD21-1-1 | | | 1553-1566 | 83.97 | 6.63 | 8.71 | 0.69 | -4.18 | -36.08 | 0.31 | |
| | LD22-1S | LD22-1-1 | | | 1486-1510 | 80.42 | 5.29 | 13.44 | 0.85 | -0.56 | -26.92 | 0.04 | |
| | LD28-1 | LD28-1-1 | | | 1655-1690 | 88.10 | 3.50 | 7.10 | 1.30 | 7.90 | -32.10 | 0.26 | |
| | LD8-1 | LD8-1-3 LD8-1-1 | Ny1 | 粉细砂岩 | 342-352 1723-1737 | 78.90 71.20 | 2.27 4.21 | 17.34 22.73 | 1.49 2.02 | -2.47 -3.65 | -34.33 -31.32 | 0.99 1.56 | |
| 琼东南盆地 | BD19-2 | BD19-2-2 | Els | 中细砂岩 | 5100.0 | 81.56 | 1.52 | 16.06 | 0.00 | -6.90 | -39.30 | 6.25 | 火山幔源型 |
| | BD15-3 | BD15-3-1 | | | 2254.0 | 98.32 | 0.28 | 1.32 | 0.00 | -4.49 | -42.30 | 5.15 | |
| 珠江口盆地西部 | WC15-1 | WC15-1-1 | N ₁ z ₁ | 中细砂岩 | 1088-1096 1250-1257 | 76.98 85.76 | 4.81 2.13 | 12.46 14.24 | 5.76 5.10 | -4.09 -3.66 | -40.00 -39.93 | 4.11 3.67 | 火山幔源型 |
| | WC14-3 | WC14-3-1 | E ₃ zh ₁ | 砂岩 | 2285-2308 | 38.87 | 1.31 | 43.62 | 16.20 | -4.53 | -41.88 | 3.06 | |
| | WC19-1 | WC19-1-6 | N ₁ z ₁ | 砂岩 | 1009-1018 | 79.00 | 6.20 | 12.00 | 2.80 | -4.30 | -50.80 | 2.81 | |
| 珠江口盆地东部 | HZ18-1 | HZ18-1-1 | E ₃ np | 砂岩 | 3127-3135.5 | 93.56 | 5.25 | 0.61 | 0.16 | -3.60 | -43.19 | 火山幔源型 | |
| | HZ22-1 | HZ22-1-1 | N ₂ z ₁ | 砂岩 | 2431-2452.5 | 99.53 | 0.06 | 0.20 | 0.13 | -4.00 | -38.00 | | |
| | PY28-2 | PY28-2-1 | N ₂ z ₁ E ₃ zh | 砂岩 砂岩 | 2943.0 3301.0 | 73.73 82.70 | 7.72 9.02 | 9.08 5.68 | 0.99 0.90 | -3.84 -3.92 | -37.26 -41.35 | | |

注:壳源型有机成因 CO₂ 未在表中列出。

新统及第四系浅海-半深海相浅层地层中,富含微生物有机质在未熟-低熟热演化阶段,通过生物化学作用所形成,其气源岩为上新统及第四系海相泥岩或未成岩沉积物。

成熟-高熟阶段的油型伴生气及煤型气,即指正常成熟油型气(原油伴生气)和成熟-高熟煤型气,多分布于北部湾盆地、莺-琼盆地及珠江口盆地,前者主要为腐泥型或偏腐泥型有机质在正常成熟热演化成油生烃过程中所伴生的天然气。由于油型气属石油伴生附带产物,故油气同源其烃源主要来自盆地断陷裂谷发育阶段沉积的具有极大生油能力的始新统中深湖相泥岩,生源母质类型则具有腐泥型和偏腐泥混合型特征,油气以大量石油伴生少量油型天然气的产状形式产出,因此,其油型气的气源构成比较单一,且油气同源。油型气的烃源对比,可通过油/岩或油/气/岩之间的轻烃、甾萜生物标志物及碳同位素和烃源岩热模拟实验结果等参数及方法,进行综合分析追踪与亲缘关系的判识与确定。油/岩甾萜生物标志物分布特征(图 2)的直观对比可以看出,南海北部边缘盆地陆源石蜡型油与始新统文昌组中深湖相烃源岩,均具有典型陆源石蜡型油气及湖相烃源

岩的地质地球化学特征,甾萜生物标志物分布,具有 C₃₀-甲基甾萜丰富(表征低等水生生物)、奥利烷含量较低(代表煤系及高等生物)的突出特点,表明陆源石蜡型油气与始新统文昌组中深湖相偏腐泥型烃源岩的亲缘关系密切,陆源石蜡型油及其伴生的油型气均主要由始新统中深湖相烃源岩所提供。后者即成熟-高熟煤型气,则主要是含煤岩系中腐殖型有机质在成熟-高熟热演化阶段所形成的大量煤型气,同时伴有少量煤型油(轻质油及凝析油)。由于煤型气与煤型油伴生,且煤型油是煤型气的附带产物,故两者亦同源。因此,通过煤型气伴生的少量煤型油的甾萜生物标志物与可能烃源岩的甾萜生物标志物的追踪对比,可以确定与判识两者的亲缘关系,综合分析判定煤型气的气源。从南海北部边缘盆地典型煤型油与煤系烃源岩甾萜生物标志物分布特征(图 3)的直观对比,可以看出,煤型凝析油与含煤岩系的甾萜生物标志物分布特征基本一致,均具有 W、T 双杜松烷(表征陆源树脂化合物)丰富、奥利烷(代表陆源高等植物)含量高的特点,表明下中新统珠江组煤型凝析油与下渐新统恩平组炭质泥岩具有密切的亲缘关系,该区煤型气及伴生的煤型凝析油,均来自成

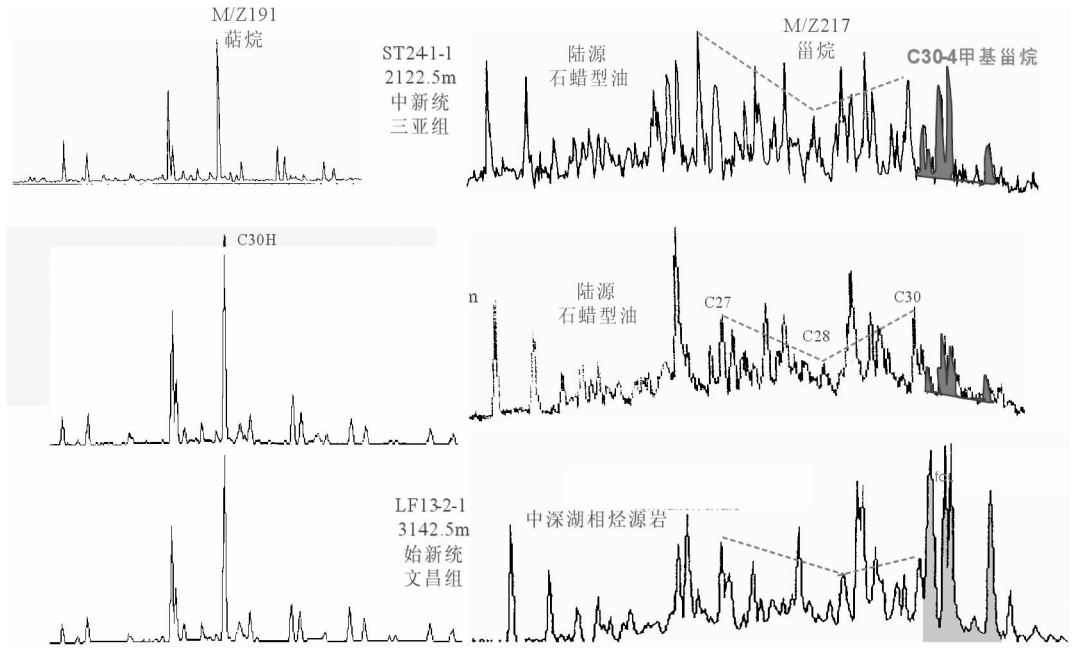


图 2 南海北部边缘盆地始新统中深湖相烃源岩与原油甾萜生物标志物特征对比
 Fig.2 Correlation between Eocene deep lacustrine hydrocarbon source rocks and characteristics crude oil steroid-terpenoid biomarkers in marginal basins of the northern South China Sea

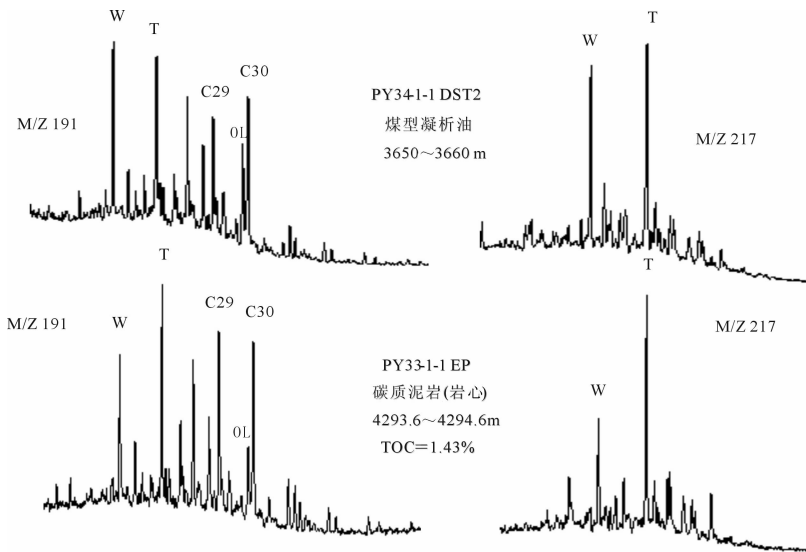


图 3 南海北部边缘盆地渐新统煤系烃源岩与煤型凝析油甾萜生物标志物对比
 Fig.3 Correlation between Oligocene coal measures hydrocarbon source rocks and coal-type condensate oil steroid-terpenoid biomarkers in marginal basins of the northern South China Sea

熟-高熟的渐新统煤系烃源岩。

高熟-过熟阶段($R_o=1.3\% \sim 2.5\%$)天然气,主要分布于莺-琼盆地及珠江口盆地东部部分地区,天然气成熟度主要依据甲烷同系物的碳同位素特点及天然

气组成特征综合判识与确定。该类天然气组成偏干,均以甲烷居绝对优势,且由于成熟度偏高故一般无液态烃伴生。高熟-过熟天然气的气源构成,主要由该区处在高熟-过熟热演化阶段的不同生源母质类型(腐

泥型、腐殖型及混合型)的烃源岩所供给,故天然气成因类型可以是煤型气亦可为油型气(图 1)。

非烃气 CO₂ 的气源构成, 根据该区 CO₂ 成因类型特点及分布富集规律, 可以确定为主要由非生物壳源型及壳幔混合型和火山幔源型 CO₂ 共同组成。非生物壳源型及壳幔混合型 CO₂, 主要分布于莺歌海盆地泥底辟带浅层, 具有平面上分区块剖面上分层分带的运聚成藏特征, 气源由中新统及上新统底部海相含钙砂泥岩与泥底辟热流体发生物理化学综合作用所形成^[31]; 火山幔源型 CO₂ 则主要来自火山幔源活动及深大断裂发育区, 由深部火山幔源活动所伴生的原始 CO₂, 通过深大断裂及火山底辟活动等有效运聚充注系统输送上来, 在邻近圈闭及浅部地层圈闭中富集成藏, 且受控于深大断裂及火山幔源活动的相互配置。

3 结论与认识

(1)南海北部边缘盆地烃类天然气成因类型, 根据外部地质营力及本身地质地球化学特征, 可划分为生物气及生物-低熟过渡带气(亚生物气)、热成因正常成熟-高熟油型气及煤型气和高熟-过熟天然气等 3 大类; 该区非烃气主要为 CO₂ 和 N₂, 且 CO₂ 资源丰富, 依据 CO₂ 通常的划分判识标准可分为壳源型(有机和无机)、壳幔混合型及火山幔源型等 3 型 4 类。

(2)生物气及亚生物气在莺-琼盆地及珠江口盆地东部浅层广泛分布, 气源主要由上新统及第四系海相沉积所提供; 正常成熟油型气主要分布于北部湾盆地、琼东南盆地东北部及珠江口盆地, 气源来自始新统中深湖相偏腐泥型烃源岩; 成熟-高熟煤型气及高熟-过熟天然气, 则主要展布于莺-琼盆地及珠江口盆地部分地区, 前者气源主要来自渐新统滨海沼泽相和河流沼泽相煤系和中新统海相偏腐殖型烃源岩, 后者气源则来自不同类型高熟-过熟烃源岩。

(3)CO₂ 主要富集于莺歌海盆地泥底辟带浅层及琼东南盆地东部和珠江口盆地部分区域, 气源分别来自受泥底辟热流体活动影响强烈的中新统海相含钙砂泥岩的物理化学作用和深部火山幔源活动与深大断裂的良好配置。

参考文献(References):

[1] 何家雄, 施小斌, 阎贫, 等. 南海北部边缘盆地油气地质特征与勘探方向 [J]. 新疆石油地质, 2007, 28(2): 129-135.

He Jiaxiong, Shi Xiaobin, Yan Ping, et al. Analysis on petroleum geology and exploratory areas in the marginal basins, northern South China Sea [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(2): 129-135 (in Chinese with English abstract).

[2] 何家雄, 施小斌, 夏斌, 等. 南海北部边缘盆地油气勘探现状与深水油气资源前景 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(3): 261-270.

He Jiaxiong, Shi Xiaobin, Xia Bin, et al. The status of the petroleum exploration in the northern South China Sea and the resource potential in the deep-water areas Advances in Earth Science, 2007, 22(3): 261-270 (in Chinese with English abstract).

[3] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1-510.

Gong Zaisheng, Li Sitian, Xie Taijun, et al. The Basin Analysis and the accumulation of Gas in the Continental Margin of the Northern of the South Sea [M]. Beijing: Science Press, 1997: 1-510 (in Chinese).

[4] 龚再升. 中国近海含油气盆地新构造运动和油气成藏 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 133-138.

Gong Zhisheng. Neotectonic movement and hydrocarbon accumulation in petroliferous basins, offshore China [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 133-138 (in Chinese with English abstract).

[5] 郝芳, 董伟良, 邹华耀, 等. 莺歌海盆地汇聚型超压流体流动及天然气晚期快速成藏 [J]. 石油学报, 2003, 24(6): 7-12.

Hao Fang, Dong Weiliang, Zhou Huayao, et al. Overpressure fluid flow and rapid accumulation of natural gas in Yinggehai Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(6): 7-12 (in Chinese with English abstract).

[6] 郝芳, 李思田, 龚再升, 等. 莺歌海盆地底辟发育机制与流体幕式充注 [J]. 中国科学, 2001, 31(6): 471-476.

Hao Fang, Li Sitian, Gong Zaisheng, et al. The mechanics of the diapir and the fluid episodic infilling of Yinggehai Basin [J]. Science in China, 2001, 31(6): 471-476 (in Chinese).

[7] 何家雄, 夏斌, 张树林, 等. 莺歌海盆地泥底辟成因、展布特征及其与天然气运聚成藏关系 [J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1336-1344.

He Jiaxiong, Xia Bin, Zhang Shulin, et al. Origin and distribution of mud diapirs in the Yinggehai basin and their relation to the migration and accumulation of natural gas [J]. Geology in China, 2006, 33(6): 1336-1344 (in Chinese with English abstract).

[8] 易平, 黄保家, 黄义文, 等. 莺-琼盆地高温超压对有机质热演化的影响 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 32-35.

Yi Ping, Huang Baojia, Huang Yiwen, et al. Influences of high temperature and overpressure on the thermal evolution of organic matter in the Ying-Qiong Basins, South China Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 32-35 (in Chinese with English abstract).

[9] 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等. 莺歌海盆地中深层天然气运聚成藏特征及勘探前景 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 37-42.

He Jiaxiong, Xia Bin, Liu Baoming, et al. Gas migration and accumulation and the exploration of the middle-deep layers in Yinggehai Basin, Offshore South China Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 37-42 (in Chinese with English abstract).

- [10] 何家雄, 陈红莲, 陈刚, 等. 莺歌海盆地泥底辟带天然气成藏条件及勘探方向[J]. 中国海上油气(地质), 1995, 9(3):155-163.
He Jiaxiong, Chen Honglian, Chen Gang, et al. Gas reservoir and exploration targets of mud diapir belt, Yinggehai Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1995, 9(3):157-163(in Chinese with English abstract).
- [11] 何家雄, 胡忠良, 刘宝明, 等. 综合开发利用南海莺-琼盆地 CO₂ 资源促进国家及中海油跨越式发展 [J]. 天然气地球科学, 2004, 15(4):401-405.
He Jiaxiong, Hu Zhongliang, Liu Baoming, et al. To utilize CO₂ reservoir in YingQiong basin of south China sea and to promote the development of CNOOC by leaps and bounds [J]. Nature Gas Geoscience, 2004, 15(4):401-405(in Chinese with English abstract).
- [12] 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等. 创建中国 CO₂ 研究开发中心促进社会经济全面、协调、可持续发展[J]. 天然气工业 2005, 25(1):161-163.
He Jiaxiong, Xia Bin, Liu Baoming, et al. Suggestion to establish CO₂ research and development center in China [J]. Nature Gas Industry, 2005, 25(1):161-163(in Chinese with English abstract).
- [13] 郝芳, 邹华耀, 黄保家, 等. 莺歌海盆地天然气生成模式及其成藏流体响应[J]. 中国科学, 2002, 32(11):889-895.
Hao Fang, Zou Huayao, Huang Baojia, et al. Gas generation model and its responds in accumulation of natural gas of Yinggehai Basin [J]. Science in China, 2002, 32(11):889-895(in Chinese).
- [14] 何家雄, 陈伟煌, 李明兴, 等. 莺-琼盆地天然气成因类型及气源剖析[J]. 中国海上油气, 2000, 14(6):398-405.
He Jiaxiong, Chen Weihuang, Li Mingxing, et al. Origin type and source of natural gas in YingQiong Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2000, 14(6):398-405(in Chinese with English abstract).
- [15] 何家雄, 钟启祥, 陈伟煌, 等. 莺歌海盆地浅层天然气成因及气源探讨[J]. 天然气地球科学, 1994, 5(6):15-27.
He Jiaxiong, Zhong Qixiang, Chen Weihuang, et al. Natural gas origin from shallow zone and source in Yinghai basin[J]. Nature Gas Geoscience, 1994, 5(6):15-27(in Chinese with English abstract).
- [16] 何家雄, 李强, 陈伟煌, 等. 琼东南盆地油气成因类型及近期天然气勘探方向探讨[J]. 海洋石油, 2002, 22(1):47-56.
He Jiaxiong, Li Qiang, Chen Weihuang, et al. Oil/gas mechanism type and gas exploratory direction in Eastsouth Hainan Basin [J]. Offshore Oil, 2002, 22(1):47-56(in Chinese with English abstract).
- [17] 何家雄, 夏斌, 孙东山, 等. 南海北部琼东南盆地油气成藏组合及运聚规律与勘探方向分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1):53-58.
He Jiaxiong, Xia Bin, Sun Dongshan, et al. Hydrocarbon accumulation, migration and play targets in Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1):53-58(in Chinese with English abstract).
- [18] 何家雄, 梁可明, 马文红, 等. 北部湾盆地海中凹陷凝析油气成因及气源探讨[J]. 天然气工业, 1993, 13(4):12-22.
He Jiaxiong, Liang Keming, Ma Wenhong, et al. Condensate geneses in Haizhong Sag in Beibuwan Basin and a discussion on hydrocarbon source[J]. Natural Gas Industry, 1993, 13(4):12-22(in Chinese with English abstract).
- [19] 何家雄, 梁可明, 张振英, 等. 珠江口盆地西区油气成因类型及成烃演化模式[J]. 石油勘探与与开发, 1991, 18(增刊):50-60.
He Jiaxiong, Liang Keming, Zhang Zhenying, et al. Oil/gas mechanism type and evolution in Zhujiangkou Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1991, 18(Supp.)50-60(in Chinese).
- [20] 朱俊章, 施和生, 庞雄, 等. 珠江口盆地番禺低隆起天然气成因和气源分析[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4):456-459.
Zhu Junzhang, Shi Hesheng, Pang Xiong, et al. Natural gas origins and gas source studies of pan low uplift in pear river mouth basin [J]. Nature Gas Geoscience, 2005, 16 (4):456-459(in Chinese with English abstract).
- [21] 朱俊章, 施和生, 庞雄, 等. 珠江口盆地番禺低隆起凝析油地球化学特征及油源分析[J]. 中国海上油气, 2006, 18(2):103-106.
Zhu Junzhang, Shi Hesheng, Pang Xiong, et al. Geochemical characteristics and oil sources of condensates in Panyu Low Uplift, PearlRiverMouth basin [J]. China offshore Oil and Gas (Geology) 2006, 18(2):103-106(in Chinese with English abstract).
- [22] 米立军, 张功成, 傅宁, 等. 珠江口盆地白云凹陷北坡-番禺低隆起油气来源及成藏分析[J]. 中国海上油气, 2006, 18(3):161-168.
Mi Lijun, Chang Gongcheng, Fu Ning, et al. An analysis of hydrocarbon source and accumulation in Panyu low -uplift and north slope of Baiyun sag, Pearl River Mouth basin [J]. China offshore Oil and Gas (Geology), 2006, 18(3):161-168(in Chinese with English abstract).
- [23] 傅宁, 米立军, 张功成, 等. 珠江口盆地白云凹陷烃源岩及北部油气成因 [J]. 石油学报, 2007, 28(3):32-38.
Fu Ning, Mi Lijun, Chang Gongcheng, et al. Source rocks and origin of oil and gas in the norther Baiyun Depression of Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3):32-38(in Chinese with English abstract).
- [24] 王存武, 陈红汉, 施和生, 等. 珠江口盆地番禺低隆起天然气成因研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(8):6-8.
Wang Cunwu, Chen Honghan, Shi Hecheng, et al. production prediction and multi-sup-pil of natural gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(8):6-8 (in Chinese with English abstract).
- [25] 戴金星. 各类天然气的成因鉴别[J]. 中国海上油气(地质), 1992, 6(1):11-19.
Dai Jinxing. Origin identification of various type gas [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1992, 6 (1):11-19 (in Chinese with English abstract).
- [26] 刘文汇, 徐永昌, 史继扬, 等. 生物-热催化过渡带气 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Liu Wenhui, Xu Yongchang, Shi Jiyang, et al. Biothermocatalytic Transitional Zone Gases [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese).
- [27] 何家雄, 刘全稳. 南海北部大陆边缘盆地 CO₂ 成因及运聚规律分析与预测[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(1):12-19.
He Jiaxiong, Liu Quanwen. Analysis and discussion to the characters on generative cause, migration and distribution of CO₂ in Yingqiong Basin in the North of the South China Sea [J]. Nature Gas

- Geoscience, 2004, 15(1):12-19(in Chinese with English abstract).
- [28] 何家雄, 陈伟煌, 李明兴, 等. 莺-琼盆地天然气中 CO₂ 成因及气源综合判识[J]. 天然气工业, 2001, 21(3):15-21.
- He Jiaxiong, Chen Weihuang, Li Mingxing, et al. CO₂ origin and gas source in YingQiong Basin [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(3):15-21(in Chinese with English abstract).
- [29] 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等. 中国东部及近海陆架盆地 CO₂ 成因及运聚规律与控制因素研究 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4):42-49.
- He Jiaxiong, Xia Bin, Liu Baoming, et al. Analysis and discussion of the characters on generative cause, migration and distribution of CO₂ in the east of China and the offshore [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4):42-49(in Chinese with English abstract).
- [30] 何家雄, 姚永坚, 刘海龄, 等. 南海北部莺歌海盆地壳源型非生物 CO₂ 运聚成藏特征与资源潜力 [J]. 中国地质, 2007, 34(5):887-893.
- He Jiaxiong, Yao Yongjian, Liu Hailing, et al. Migration and accumulation characteristics and resource potential of crust-derived inorganic CO₂ in the Yinggehai basin, northern South China Sea [J]. Geology in China, 2007, 34 (5):887-893 (in Chinese with English abstract).
- [31] 何家雄, 李明兴, 陈伟煌, 等. 莺歌海盆地热流体上侵活动与天然气运聚富集关系探讨[J]. 天然气地球科学, 2000, 11(6):29-43.
- He Jiaxiong, et al. Geotemperature field and upwelling action of hot flow body and its relationship with natural gas migration and accumulation in Yinggehai Basin[J]. Nature Gas Geoscience, 2000, 11(6):29-43(in Chinese with English abstract).

Genetic types of natural gas and characteristic of the gas source composition in marginal basins of the northern South China Sea

HE Jia-xiong¹, YAO Yong-jian², LIU Hai-ling¹, WAN Zhi-feng¹

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510760, Guangdong, China)

Abstract: The phenomena of petroleum geology are rich and colorful in marginal basins of the northern South China Sea. The genetic types and distribution of natural gas are complex. Based on the previous research and exploration, the discovered natural gas can be divided into three types: biogenic and sub-biogenic gas, normal and high-mature petroliferous gas and coal-related gas, high and over-mature natural gas. There are also three types of non-hydrocarbon gas (CO₂), which are crust-derived type, mantle-derived type and crust-mantle mixed type. The biogenic and sub-biogenic gas, which was derived from Pliocene and Quaternary marine deposits, is distributed widely in shallow layers of the Ying-Qiong basin and Zhujiangkou (Pearl River Mouth) basin. The normal mature petroliferous gas, which was derived from Eocene middle- and deep-lake facies, is mainly found in the Beibuwan basin, northeastern Qiongdongnan basin and Zhujiangkou basin. The normal and high-mature coal-related gas, which was derived from Oligocene coal measures and Miocene marine source rocks, and high and over-mature natural gas, which was derived from different types of high and over-mature source rocks, are mainly found in the Ying-Qiong basin and some areas of the Zhujiangkou basin. CO₂ is mainly concentrated in the diapiric zone of the Yinggehai sea basin, eastern Qiongdongnan basin and some areas of the Zhujiangkou basin. It was derived from Miocene marine calcareous arenaceous-argillaceous rocks affected strongly by mud diapiric hydrothermal activity and deep volcanic mantle-derived materials.

Key words: northern South China Sea; biogenic gas; normal mature petroliferous gas; mature and high-mature coal-related gas; genetic types of CO₂; characteristics of gas source composition

Author the first author: HE Jia-xiong, male, born in 1956, professor and doctor, engages in oil/gas exploration and integrated geological research; E-mail: hejx@gig.ac.cn.