



## 南海北部琼东南盆地烃源岩发育特征与气源综合分析

刘 昆, 宋 鹏, 胡雯燕, 李 虎, 毛雪莲

### Developmental characteristics of source rock and gas source analysis in Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea

LIU Kun, SONG Peng, HU Wenyan, LI Hu, and MAO Xuelian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022060601>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 南海南部海陆过渡相烃源岩的两类分布模式

Two distribution patterns of the marine–continental transitional source rocks in the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 173

#### 南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenhu area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101

#### 华南下扬子区早寒武世幕府山组沉积环境：来自于全岩地球化学的启示

Sedimentary environment of the Lower Cambrian Mufushan Formation in the Lower Yangtze region: Evidence from whole–rock geochemistry

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 82

#### 珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程：碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source–to–sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

#### 南海北部陆坡神狐海域SH–CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH–CL38 in the Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90

#### 南薇西含油气盆地地层层序及生储盖组合特征

Characteristics of stratigraphic sequence and the source–reservoir–cap assemblages in the Nanweixi petroliferous basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 163



关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘昆, 宋鹏, 胡雯燕, 等. 南海北部琼东南盆地烃源岩发育特征与气源综合分析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(6): 173-184.  
LIU Kun, SONG Peng, HU Wenyan, et al. Developmental characteristics of source rock and gas source analysis in Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(6): 173-184.

# 南海北部琼东南盆地烃源岩发育特征与气源综合分析

刘昆<sup>1</sup>, 宋鹏<sup>2</sup>, 胡雯燕<sup>2</sup>, 李虎<sup>2</sup>, 毛雪莲<sup>1</sup>

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057  
2. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570312

**摘要:** 琼东南盆地是一个具有巨厚古近系和新近系沉积的新生代沉积盆地, 烃源岩主要发育于始新世、渐新世、中新世 3 个时期。渐新统煤系烃源岩具有广覆式分布的特点, 有机质丰度最高, 是盆地主力烃源岩; 中新统浅海—半深海相烃源岩在深水中央坳陷厚度大且分布稳定, 生烃转化率较高, 但有机质丰度较渐新统偏低, 是盆地潜在烃源岩; 始新统湖相地层虽然探井尚未钻遇, 但地震相特征及烃源对比表明, 盆地大部分地区均存在始新统中深湖相烃源岩。应用元素地球化学方法分别对盆地不同区带不同时期生物发育的古生产力、古气候及水动力特征等进行了分析研究, 初步证实中央坳陷古生产力最高, 其次为中部隆起区, 北部坳陷则相对较低。基于以上研究, 提出了琼东南盆地烃源岩主要发育于 3 个时期, 有 4 种类型: 始新统中深湖相烃源岩、早渐新统崖城组海陆过渡相煤系烃源岩、中—晚渐新统崖城-陵水组半封闭浅海相陆源烃源岩及中新统浅海—半深海相陆源潜在烃源岩。在此基础上, 根据大量油气勘探成果及油气地球化学特征, 综合判识认为盆地中央坳陷带是渐新统烃源岩最有利发育区且生烃潜力大, 其次为北部坳陷带和中部隆起区。气源综合判识表明, 中央坳陷带目前勘探发现的深水气田群气源供给主要来自渐新统崖城组煤系烃源岩及半封闭浅海相陆源烃源岩, 而北部坳陷带广大区域油气来源则可能主要来自始新统湖相烃源岩。

**关键词:** 烃源岩发育特征; 古环境; 元素地球化学; 气源综合分析判识; 琼东南盆地

中图分类号: P744.4 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022060601

## Developmental characteristics of source rock and gas source analysis in Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea

LIU Kun<sup>1</sup>, SONG Peng<sup>2</sup>, HU Wenyan<sup>2</sup>, LI Hu<sup>2</sup>, MAO Xuelian<sup>1</sup>

1. Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, China  
2. Hainan Branch of CNOOC Ltd., Haikou 570312, China

**Abstract:** The Cenozoic Qiongdongnan Basin hosts a very thick Tertiary strata including three sets of source rocks from bottom to top: the Eocene, the Oligocene (containing Lingshui-Yacheng Formation), and the Miocene. The Oligocene is the key source rock with high abundance of organic matter widespread in basin and coal-bearing strata developed locally. The Miocene is thick neritic-bathyal facies that distributed stably in the central depression zone with high hydrocarbon conversion rate and is potential type of source rock. The Eocene is a set of important hydrocarbon source rocks and has not been drilled through at present. However, seismology study shows that the northern depression belt developed source rocks of semi-deep lacustrine deposits. Study of elemental geochemistry shows that the central depression zone has the highest paleoproductivity; the central uplift belt is in the second place; and the northern depression belt has the lowest paleoproductivity. The paleoclimate of the early Oligocene and early Miocene were warm and favorable to the development of source rocks. Based on the above information, three developmental modes was put forward, i.e., the transitional facies, the semi-enclosed marine facies, and the marine facies. On the basis of modes above, the most advantageous zones that contain high quality source rock is the central depression belt. The northern depression belt and the central uplift belt are in the second place. In addition, geochemistry data, the composition and carbon isotope characteristics of gas indicate that the gas-bearing structure in the northern depression belt is characterized by oil type gas, which may be contributed by the Eocene. The gas fields in the central depression mainly come from the Oligocene Yacheng Formation, featured coal type gas.

**Key words:** source rock distribution; paleo-environment; elemental geochemistry; gas source analysis; Qiongdongnan Basin

资助项目: 中国海洋石油集团有限公司科技项目“南海大中型天然气田形成条件、勘探潜力与突破方向”(KJZH-2021-0003-00)

作者简介: 刘昆, 男, (1984—), 硕士, 工程师, 主要从事天然气勘探研究, E-mail: liukun1@cnooc.com.cn

收稿日期: 2022-06-06; 改回日期: 2022-07-13. 张现荣编辑

琼东南盆地新生代油气地质条件较复杂,具有发育多套烃源岩的复合含油气系统,富含以天然气为主的多种油气资源<sup>[1-3]</sup>。琼东南盆地早期油气勘探活动主要集中于盆地西部水深<300 m的浅水区,而盆地70%油气资源主要集中于目前油气勘探程度尚低、水深>300 m的深水区域。近年来,琼东南盆地油气勘探逐渐从浅水区向深水区拓展,在盆地南部深水区中央坳陷峡谷水道先后勘探发现了陵水17、陵水18及陵水25等大中型商业气田,展现出深水区巨大的油气勘探潜力<sup>[4-6]</sup>。琼东南盆地不同的构造带天然气藏分布及产出特征差异显著,油气勘探中先后发现生物气、油型气和煤型气及非常规气(水合物)等多种类型的天然气资源,且其烃源岩构成及成因较复杂<sup>[7]</sup>。目前,对于琼东南盆地不同区域不同层系,尤其是对中央坳陷带深水区不同类型烃源岩发育模式和分布特征等还缺乏深入系统的综合分析研究,进而严重影响和制约了该区油气资源全面评价预测与油气勘探部署。鉴此,本文拟通过琼东南盆地典型钻井样品的地质地球化学分析,充分结合区域构造沉积演化特征及地震地质解释,重点聚焦盆地不同时期不同区域古环境与沉积相特征及其对不同类型烃源岩发育模式的控制影响作用研究,旨在为该区有利油气勘探区

带综合评价与钻探目标预测优选及井位部署决策等提供指导与参考。

## 1 区域地质及勘探概况

琼东南盆地位于海南岛与西沙群岛之间海域,呈NE-SW走向展布,是南海北部大陆边缘西区新生代主要的断陷盆地,具有“下部古近系断陷,上部新近系及第四系坳陷”的双层结构和凹陷相间的基本特征。盆地由北向南,可划分为北部坳陷带、中部隆起带、中央坳陷带和南部隆起带4个主要一级构造单元(图1)。北部坳陷包括崖北凹陷、松东凹陷、松西凹陷;中部隆起由崖城凸起、松涛凸起、陵水低凸起和崖南低凸起构成;中央坳陷主要由崖南凹陷、乐东凹陷、陵水凹陷、松南凹陷、北礁凹陷、宝岛凹陷和长昌凹陷所构成。

盆地新生代沉积充填序列主要由古近系、新近系和第四系组成,其中古近系包括始新统、渐新统崖城组和陵水组,新近系主要为中新统三亚组、梅山组、黄流组及上新统莺歌海组,第四系主要为乐东组。始新统以湖相沉积为主,为盆地早期断陷的产物;下渐新统崖城组形成于断陷晚期,其沉积环境由早期断陷湖盆逐渐转变为断陷晚期半封闭海

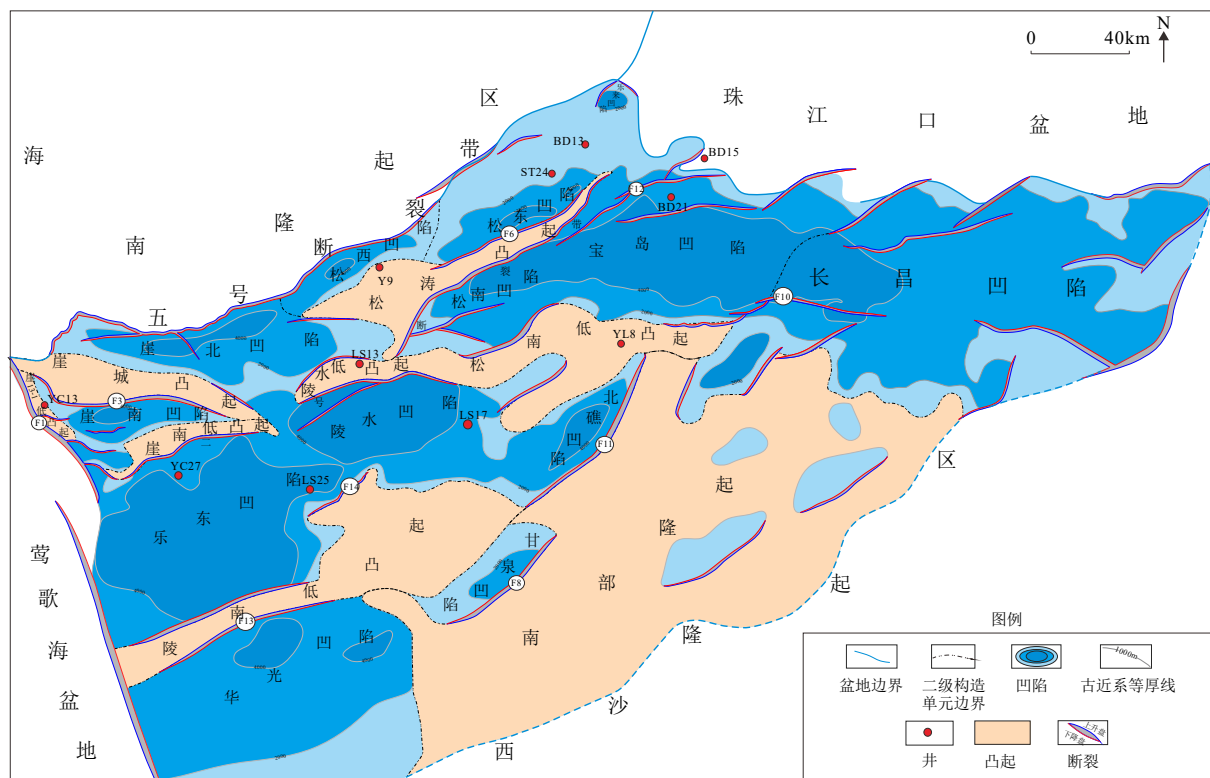


图1 南海北部琼东南盆地新生代构造区划及构造单元分布基本特征  
Fig.1 Tectonic division of Qiongdongnan Basin in the northern South China Sea

湾环境, 主要沉积充填了浅海相和海岸沼泽平原沉积, 是盆地古近系主要烃源岩。上渐新统陵水组则主要以滨浅海相沉积为主, 沉积充填了一套半封闭浅海相烃源岩。中新世盆地进入大规模海相拗陷期, 整体处于浅海—深海的沉积环境, 这一时期盆地中央拗陷区沉积了巨厚海相碎屑岩沉积, 部分区域形成了一套海相陆源潜在烃源岩。

琼东南盆地油气勘探自 20 世纪 70 年代以来历经半个多世纪, 迄今已取得了重大突破和进展。最新油气资源评价表明, 琼东南盆地剩余油气资源潜力达到 2 万亿  $\text{m}^3$ , 且盆地油气勘探目前仍处于早期勘探阶段, 剩余资源潜力巨大。油气有机成因理论及勘探实践证实, 沉积盆地油气资源潜力主要取决于其烃源岩物质基础, 即烃源岩发育展布规模及其质量优劣; 因此, 盆地烃源岩发育展布、规模及其质量的研究至关重要。前人对琼东南盆地烃源岩研究已有一些重要的成果及认识, 认为该区渐新统海岸平原煤系地层是盆地主要气源岩, 具有较大的生气能力, 是琼东南盆地首个大型气田崖城 13-1 的主要贡献者<sup>[1]</sup>, 但随后围绕崖南凹陷集中重点实施油气勘探, 成效并不理想, 仅发现一些小型气田和含气构造, 因此, 对于渐新统海陆过渡相烃源岩是否在盆地广泛分布一度尚存疑虑, 直到盆地南部深水乐东-陵水凹陷陵水 17 深水大气田的勘探发现, 并获得了其天然气地球化学特征与崖城 13-1 天然气一致的重要证据, 充分证实了琼东南盆地渐新统煤系烃源岩发育展布规模及其供烃系统并非局限分布, 具有该盆地主力烃源岩地位及油气成藏主要贡献者的重要作用。

鉴此, 本文从盆地构造沉积演化特征和元素地球化学的角度, 针对琼东南盆地主要烃源岩系形成环境和分布特征展开研究, 重点分析渐新统海岸平原相煤系和半封闭浅海相陆源烃源岩的古地理环境条件, 同时亦分析探讨中新统海相陆源潜在烃源岩生烃潜力, 以期为盆地进一步的油气勘探部署及有利油气勘探区带评价提供重要地质依据。

## 2 烃源岩形成演化及分布特征

根据大量的钻井地球化学分析数据, 充分结合盆地构造沉积演化及充填特征与地震地质分析解释结果, 以及不同凹陷不同区带油气地球化学特征与烃源岩系统全面的对比, 综合判识确定琼东南盆地新生代区域上主要发育始新统湖相烃源岩、渐新统海陆过渡相-半封闭浅海相煤系烃源岩及中新统

浅海-半深海相陆源潜在烃源岩。这个时期的烃源岩受到不同构造演化阶段及沉积环境的控制, 其沉积特征、生源母质类型、生烃潜力与分布特点等均存在较大差异。

### 2.1 始新统湖相烃源岩

始新世时期受太平洋板块向欧亚板块俯冲作用的影响, 盆地基底在 NW-SE 向拉伸应力场作用下开始张裂, 形成了 NE 向展布的半地堑断陷湖盆群。该时期盆地的分割性很强, 处于隆凹相间构造格局, 接受断陷期充填, 盆地整体连通性差<sup>[8]</sup>。始新统烃源岩主要为中深湖相沉积, 该套烃源岩在琼东南盆地内尚未钻遇, 但与珠江口盆地已钻始新统文昌组烃源岩的地震相特征极其相似, 且莺 9 井及宝岛 15 区钻井获原油的生物标志化合物特征显示有来自始新统湖相烃源岩的贡献<sup>[9]</sup>。该套地层受早期断陷控制, 由于张裂是从盆地北部开始逐渐向南传递, 所以始新统地层厚度表现为北部凹陷厚、南部凹陷薄的特点, 主要集中在箕状半地堑的控凹断裂下降盘(图 2), 在北部拗陷带呈 NE 向窄条带状展布, 在中央拗陷带乐东、陵水凹陷分布较为局限。

### 2.2 渐新统海陆过渡相—半封闭浅海相陆源烃源岩

渐新世早期由于印支地块旋转挤出, 导致红河断裂体系左旋走滑, 盆地西区沿 1 号断裂带拉分, 越靠近走滑断层尾部的区域伸展分量越大, 使盆地呈向西张开的喇叭状几何形态, 西部伸展大于东部, 南部大北部。因此, 从崖北凹陷至乐东凹陷渐新统崖城组向南逐渐变厚, 而且崖城组的地层厚度横向分布稳定, 地貌整体较平缓, 有利于成煤, 是盆地烃源岩发育最重要的时期。崖城组沉积时期各凹陷间分割性减弱, 凸起范围有所缩小, 沉积环境有多水系、多物源的特点,

早期表现为海陆过渡相沉积环境, 中晚期则变为半封闭浅海沉积环境。海岸平原为琼东南盆地崖城组烃源岩发育的主要沉积相类型之一, 除了在中央拗陷周缘及南部隆起区大面积分布外, 崖城脊、崖城凸起东南倾没端、松涛凸起北坡均有海岸平原发育, 厚度薄而稳定, 一般小于 300 m。由于崖城组沉积时平缓的地势, 该时期的滨海相与一般波浪作用为主的砂质滨海不同, 多以潮汐作用为主, 此种滨海含较多的沼泽、潟湖和潮坪沉积, 亦可形成含煤层系, 这种富含煤的滨海相分布广泛<sup>[9]</sup>。总体上, 盆地崖城组烃源岩具有广覆式分布特征(图 3), 不局限于凹陷中心, 是盆地主力烃源岩层系。到渐

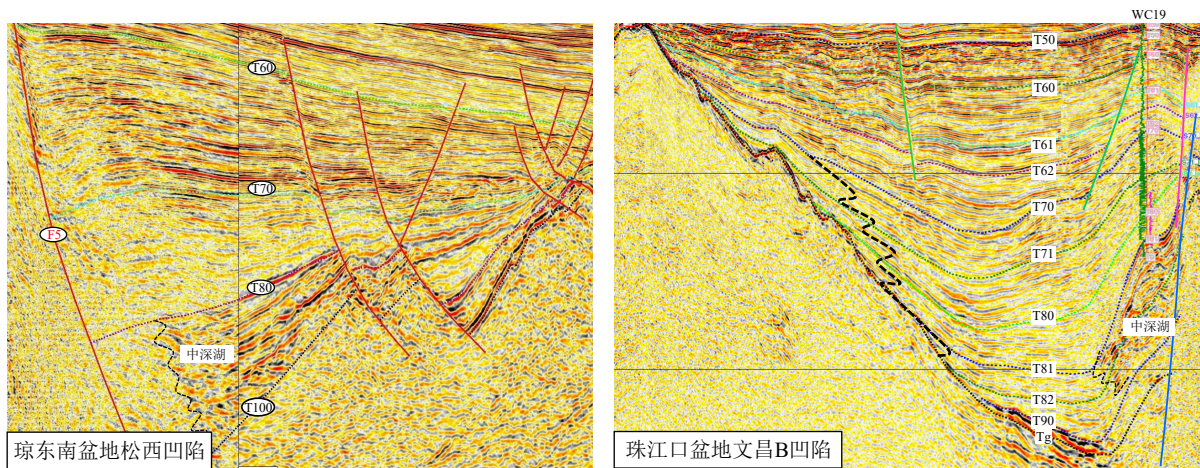


图2 琼东南盆地始新统与珠江口盆地始新统沉积地震相特征对比

Fig.2 Comparison of the Eocene seismic facies between the Qiongdongnan Basin and the Pearl River Mouth Basin

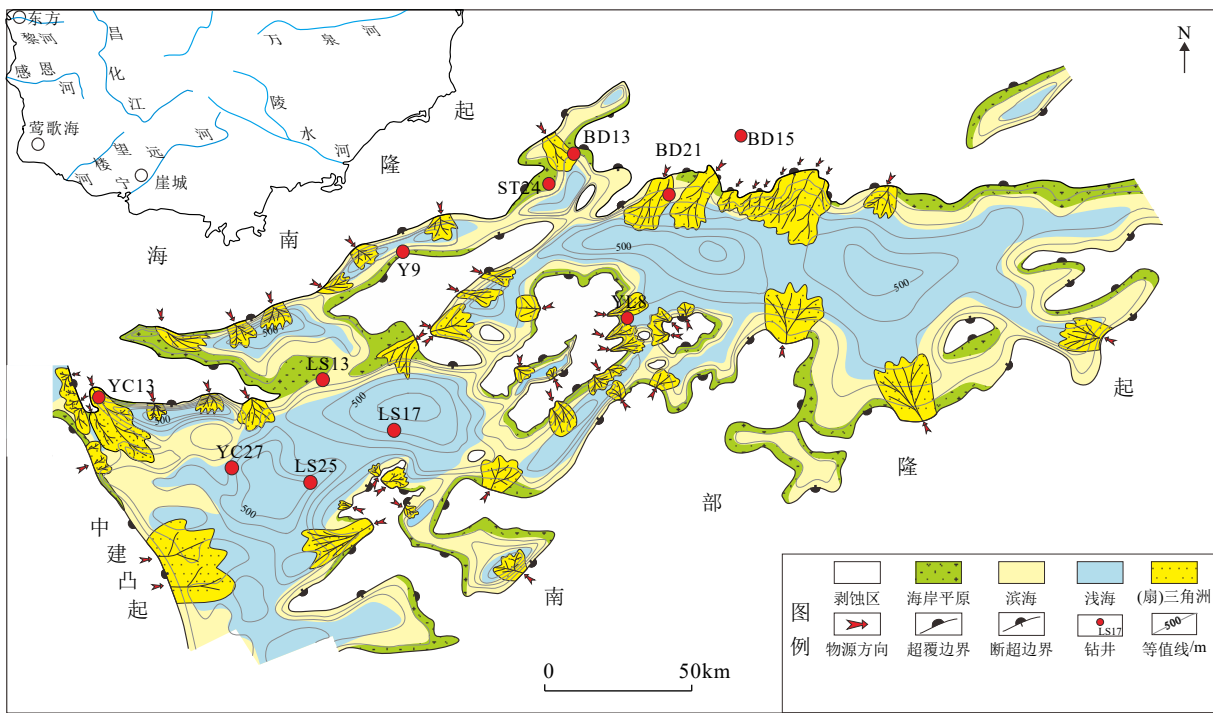


图3 南海北部琼东南盆地渐新统崖城组沉积相区域展布特征

Fig.3 Regional sedimentary facies of the Yacheng Formation (Early Oligocene) in Qiongdongnan Basin

新世晚期(陵水组沉积期),海侵范围继续扩大,水深增加,古地貌格局与下伏地层仍具有继承性,中央坳陷带沉降加速,浅海相沉积展布规模扩大,主要在凹陷中央呈长条形展布,这种半封闭浅海环境也有利于有机质富集。该时期近源扇三角洲较为发育,形成前扇三角洲与近岸浅海相源岩组合,与海岸平原含煤源岩相比,浅海相源岩中的有机质既可来源于陆生高等植物生源,亦可来源于水生浮游植物,具有双源特征<sup>[10-11]</sup>。总之,崖城组是盆地渐新世主力烃源岩,主要由海岸平原煤系、碳质泥岩,半封闭浅海相暗色泥岩3种岩石类型所构成,其生源

母质主要来自陆源高等植物。由表1可以看出,煤系地层有机碳(TOC)平均含量为52.03%;碳质泥岩TOC平均为8.44%;煤层与碳质泥岩有机碳含量普遍较高,达到好的烃源岩标准。暗色泥岩TOC平均为0.88%,接近1%,达到中等烃源岩标准,烃源岩总体有机质丰度高,生气潜力最好。

### 2.3 中新统海相潜在烃源岩

中新世后盆地进入裂后坳陷充填期(三亚组、梅山组、黄流组沉积期),海侵范围继续扩大,沉积环境逐渐转变为浅海—半深海。三亚组沉积期水

表 1 琼东南盆地第三系烃源岩岩性特征及有机质丰度综合评价  
Table 1 Comprehensive evaluation of lithologic characteristics and organic matter abundance of the Tertiary source rocks in Qiongdongnan Basin

层位	岩性	TOC/%	级别	S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> /(mg/g)	级别	HC/10 <sup>6</sup>	级别	总评
黄流组	暗色泥岩	0.22~2.76	中等烃源岩	0.01~2.14	较差烃源岩	40.1~295.4	较差烃源岩	较差—中等烃源岩
		0.62(82)		0.53(72)		132.2(60)		
梅山组	暗色泥岩	0.22~2.1	中等烃源岩	0.03~3.35	较差烃源岩	55.2~335.6	较差烃源岩	较差—中等烃源岩
		0.60(37)		0.63(32)		170.2(30)		
三亚组	暗色泥岩	0.21~0.90	较差烃源岩	0.04~5.21	较差烃源岩	78.4~378.2	较差烃源岩	较差烃源岩
		0.58(41)		0.62(43)		187.6(24)		
陵水组	暗色泥岩	0.22~5.45	中等烃源岩	0.03~11.6	较差烃源岩	60.7~356.6	中等烃源岩	中等—较差烃源岩
		0.72(41)		0.84(33)		212(30)		
崖城组	暗色泥岩	0.22~4.17	中等烃源岩	0.06~6.78	较差烃源岩	99.5~500.2	中等烃源岩	好的烃源岩
		0.88(60)		0.80(56)		260.2(46)		
	碳质泥岩	6.69~9.90	好的烃源岩	7.7~23.42	好的烃源岩			
		8.44(7)		16.37(7)				
	煤	32.27~81.7	好的烃源岩	12.4~154.4	好的烃源岩			
	52.03(10)	93.31(10)						

注: 表中数据格式: 最小值~最大值/平均值(样品数)。

深相对较浅,以滨浅海相为特征,该时期在盆地东北部的长昌凹陷北缘最先形成陆架陆坡体系雏形。梅山组沉积期,海相沉积范围进一步扩大,水体继续加深,地层厚度普遍不大但横向分布稳定,反映沉积时地势较平缓。黄流组沉积时期盆地进入加速拗陷阶段,断裂基本停止活动,盆地北部形成典型的被动大陆边缘陆架坡折体系,开始出现半深海沉积。中新统烃源岩在不同凹陷分布存在差异,其在中央拗陷带陵水—乐东凹陷沉积最厚,平均达 3 000~5 000 m,泥岩占比高达 70%,整体为一套巨厚的半深海—深海泥岩。目前已钻遇中新统的探井大多数位于盆地边缘或斜坡带,黄流组和梅山组泥岩 TOC 含量平均值为 0.6%~1%,为中等烃源岩,三亚组均值 0.58%,属于较差烃源岩(表 1),但中新统烃源岩在横向上与纵向上都具有明显的非均质性,局部层段有机质丰度高,如陵水凹陷 LS13 井黄流组、梅山组 TOC 含量均小于 1%,而三亚组泥岩有机质丰度局部较高,TOC 均值 1.12%,为好烃源岩级别;在乐东凹陷 YC27 井黄流组泥岩段 TOC 平均含量明显高于梅山—三亚组,部分层段平均值达 2.2%。中新统在北部拗陷带与中部隆起带埋深 1 000~3 000 m,处于非成熟—低成熟阶段,但在中央拗陷带西区乐东凹陷由于晚期快速沉降,埋深超过 4 000 m,现今成熟度  $R_0$  平均达到 1.4%,正处

于生气高峰,其产烃率大多数为 40~90 mgHC/g,其生烃潜力不容忽视<sup>[12-13]</sup>。

### 3 烃源岩形成的古环境分析

烃源岩发育受控于物源输入、古生产力、古气候及保存条件等多种环境因素影响,目前用于烃源岩沉积环境的判别主要有常量元素法、微量元素法及同位素相关参数比值法等<sup>[14]</sup>。因此,本文主要通过元素地球化学方法来对琼东南盆地烃源岩形成时的古环境特征展开分析。

#### 3.1 烃源岩形成的古生产力特征

生产力是指生物在能量循环过程中固定能量的速率,即单位面积、单位时间内所富集的有机物含量,古生产力高的沉积环境容易富集有机质形成好烃源岩。生产力通常用  $g \cdot m^{-2} \cdot a$  的有机碳或  $k \cdot cm^{-2} \cdot a$  的能量来表示。通过主量或微量元素定性衡量古生产力是目前较为常见手段,国内外学者提出不同元素的判断方法,Dymond、Francois 等提出了各自的基于 Ba 沉积通量计算初级生产力的公式<sup>[15-16]</sup>;Murray 提出用 Al/Ti 定性分析古生产力<sup>[17]</sup>。沉积物梯度淋溶实验,发现 95% 以上的 Ti 存在于残渣矿物相,而约 50% 的 Al 与生源组分结合,因此,

Al/Ti 值取决于清除作用的生物数量,可以反映古生产力。韦刚健<sup>[18]</sup>则认为 Al 不仅来自陆源输入,海洋沉积物中同样存在明显的自生 Al 富集,往往与生物硅的捕获有关,可以反映表层海水生产力的变化。Ti 则主要来自陆源碎屑含量,在大陆边缘盆地 Al/Ti 值是陆源碎屑和海洋生物自生富集的综合响应。因此,本文选取 Al/Ti 比值来判断琼东南烃源岩形成时古生产力条件,包含原生和陆源输入两种因素。分析结果表明,Al/Ti 值与 TOC 显示出较高的正相关性(图 4)。从地质时间上看,Al/Ti 值渐新世最高,反映了琼东南盆地渐新世海陆过渡—半封闭浅海环境物源输入充足,古生产力较高,中新世逐渐开阔大洋环境,陆源输入影响变小,Al/Ti 值与 TOC 随时间同步降低。从区带上看,中央坳陷受到陆源供给与海洋浮游生物的初级生产力双重贡献,其 Al/Ti 比值要明显高于北部坳陷带和中部隆起带,说明中央坳陷带深水区的古生产力要高于浅水区,易于形成好烃源岩(图 5)。

### 3.2 烃源岩形成的古气候特征

气候变化是影响生物发育和有机质形成的主要因素之一,温暖的气候有利于植物的生长,而寒冷的气候生物生长受到抑制。干燥少雨的气候条件下,入海径流量小,陆源有机质输入减少,水体营养矿物质含量降低,使水生浮游生物生长受限制,原始有机质生产力低。而在潮湿多雨气候条件下,入海径流量大,带来丰富的陆生植物和营养物质,使水生浮游生物得以大量繁衍,从而使有机质生产力提高<sup>[19]</sup>。元素地球化学是推断古气候常用的有效方法之一,常量元素和微量元素的分配特征和相关比值变化在一定程度上指示着古气候环境的演

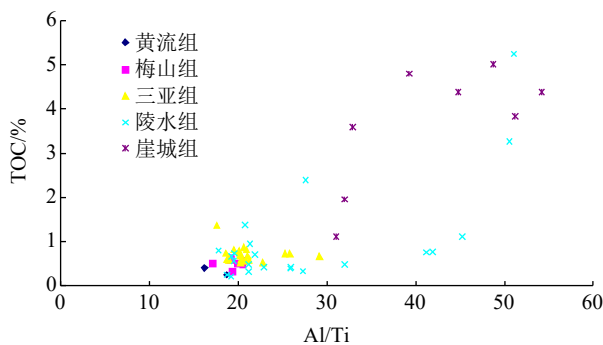


图 4 琼东南盆地不同层位烃源岩 Al/Ti 值与 TOC 相关性特征

Fig.4 Correlation between Al/Ti values and TOC contents of typical source rocks in different strata and tectonic regions of the Qiongdongnan Basin.

化历程。岩层中元素的分配一方面取决于元素本身的物理化学性质,另一方面又受到古气候、古环境影响。目前古气候的研究方法有 Ca/Mg 比值法、稀土元素 $\Sigma$ REE 值法、气候指数“C”值法,本文选用兰州地质研究所提出微量元素与常量元素比“C”值法来半定量判别研究区不同时期古气候特征<sup>[20]</sup>。在潮湿气候条件下,沉积岩中 Fe、Mn、Cr、V、N、Co 等元素含量较高,在干燥气候条件下,由于大气降水减少,地表水分大量蒸发使盆地水介质的碱性增强,Ca、Mg、K、Na、Sr、Ba 等被大量析出沉积在水底,因此岩石中它们的含量相对较高。因此,可以利用这两类元素的比值计算气候指数“C”值: $C=(Fe+Mn+Cr+Ni+V+Co)/(Ca+Mg+Sr+Ba+K+Na)$ 。图 6 是根据样品分析得出不同时期的“C”值变化特征,从气候指数分布来看,早渐新世(崖城组)气温较晚渐新世(陵水组)沉积期温暖,早中新世温度上升达到阶段峰值,随后气候逐渐变冷,直至进入第四纪冰期,这与氧同位素变化揭示的全球温度变

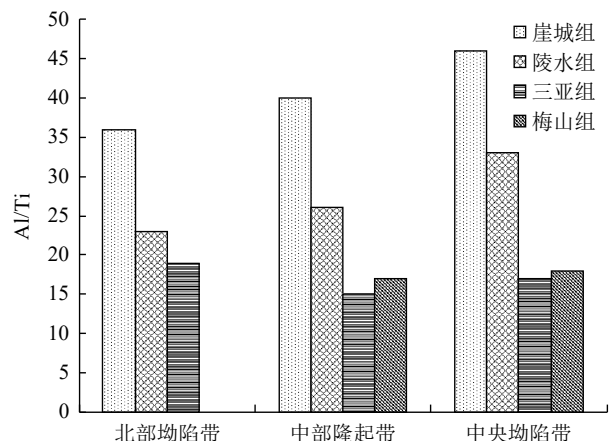


图 5 琼东南盆地各区带 Al/Ti 值分布特征及表征的古生产力特点

Fig.5 The Al/Ti values of typical source rocks in different strata and tectonic regions of the Qiongdongnan Basin

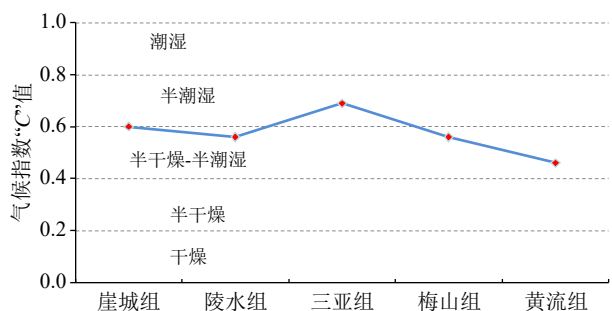


图 6 琼东南盆地渐新世—中新世气候指数特点及沉积古气候环境特征

Fig.6 Characteristics of the Oligocene-Miocene climate index and sedimentary paleoclimate environment in Qiongdongnan Basin

化趋势是一致的。崖城组沉积期处于海陆过渡相沉积环境的同时叠加了温暖的气候条件, 易于生物的生长发育, 成为了琼东南发育好烃源岩的最佳时期, 这与目前钻探揭示的高丰度烃源岩主要集中在崖城组的现象是吻合的。

### 3.3 烃源岩形成的水动力特征

有机质保存与水动力条件有较大关系, 一般情况下沉积岩粒度特征是沉积时水动力强度的反映, 黏土等细粒物质组分的增加, 指示水体趋于平静。锆 (Zr) 是典型的亲陆惰性元素, 主要以锆石等稳定重矿物形式沉淀于滨浅海区, 碎屑岩中 Zr 含量常被作为指示物源区距离海岸线远近的标志<sup>[21]</sup>。赵一阳<sup>[22]</sup>对我国浅海沉积物的研究表明, Zr 通常富集于砂岩, 而泥沉积区是 Zr 的低值区, 这说明 Zr 的高值总是与粗粒沉积岩相对应, 反映出高能环境。铷 (Rb) 在海相沉积岩中主要以硅酸盐态赋存于黏土、云母等细粒或轻矿物中, 易沉淀于低能环境<sup>[23]</sup>。因此, 用 Zr/Rb 比值可反映水动力的强弱, 水动力弱有利于有机质保存, 海相好烃源岩一般形成于不受波浪干扰安静的弱水动力环境<sup>[24]</sup>。琼东南盆地水动力大小和烃源岩有机质丰度表现出很好的负相关性 (图 7), 有机质丰度高, 水动力弱, 反之亦然。Zr/Rb 值的分布特征表明, 不同区带烃源岩水动力条件有明显差别, 北部拗陷带水动力相对较弱, 其次为中央拗陷带, 中部隆起带受波浪作用水动力最强。因此, 北部拗陷带有机质保存条件最好, 其次是中央拗陷带, 中部隆起带有机质保存条件最差

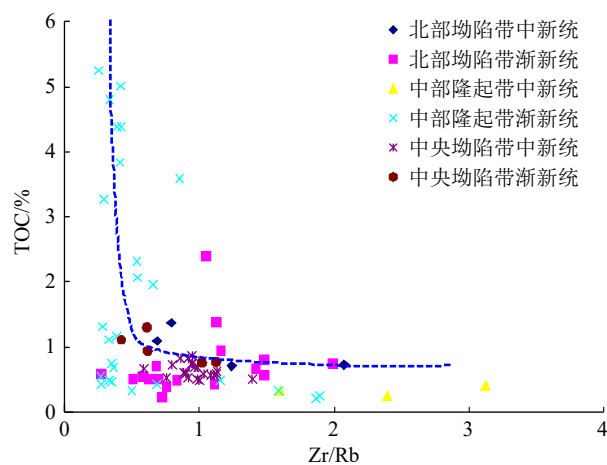


图 7 琼东南盆地不同层位烃源岩 Zr/Rb 值与 TOC 相关性特征

Fig.7 Correlations between Zr/Rb ratios and TOC contents of typical source rocks in different strata and tectonic regions of the Qiongdongnan Basin

(图 8)。从地质时期看, 渐新世崖城-陵水期 Zr/Rb 值要低于中新世三亚—梅山组期, 这与渐新世琼东南整体处于半封闭—局限海弱水动力沉积背景相符, 到中新世逐渐演变为广海环境, 整体水动力条件增强。

## 4 烃源岩沉积演化特点及展布

根据琼东南盆地油气勘探实践及烃源岩对比结果, 结合烃源岩形成的岩相古地理背景以及无机地球化学元素分析, 综合判识该区烃源岩主要形成于 3 个时期, 发育 4 种类型, 其形成沉积环境与展布特征如下 (图 9)。

### 4.1 始新世中深湖相烃源岩

始新统形成于断陷湖盆充填阶段, 主要为陆相湖泊沉积。北部拗陷带中深湖沉积主要发育在控注断层下降盘, 厚度较大, 是始新统烃源岩最有利的发育区带; 中部隆起带主要为滨湖相沉积, 呈环带状分布; 中央拗陷带湖盆拉伸扩张时间晚于北部拗陷带, 中深湖相地层厚度较北部拗陷带薄, 始新统湖相烃源岩分布受到了一定程度的限制。

### 4.2 早渐新世海陆过渡相烃源岩

崖城组沉积时期北部拗陷带以海陆过渡相为主, 发育海岸平原, 中央拗陷带以滨浅海相沉积为主, 中部隆起带发育海陆过渡相沼泽。地球化学分析表明, 崖城组烃源岩在不同区带沉积环境存在差异, 总体上气候温暖, 古生产力较高; 北部拗陷带沼泽周边地区水动力弱, 以陆源高等植物的输入为

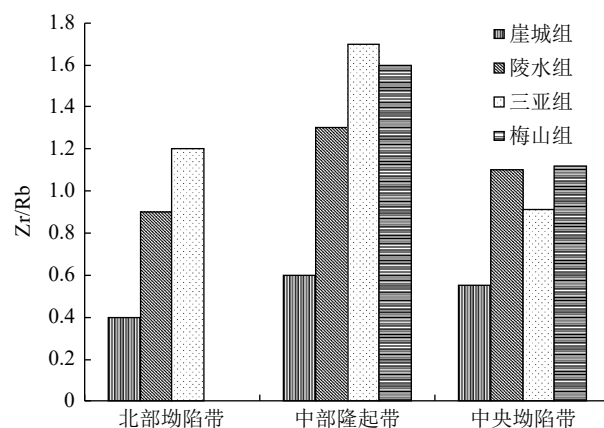


图 8 琼东南盆地各区带 Zr/Rb 值分布所表征水动力条件特点

Fig.8 The Zr/Rb values of typical source rocks in different strata and tectonic regions of the Qiongdongnan Basin



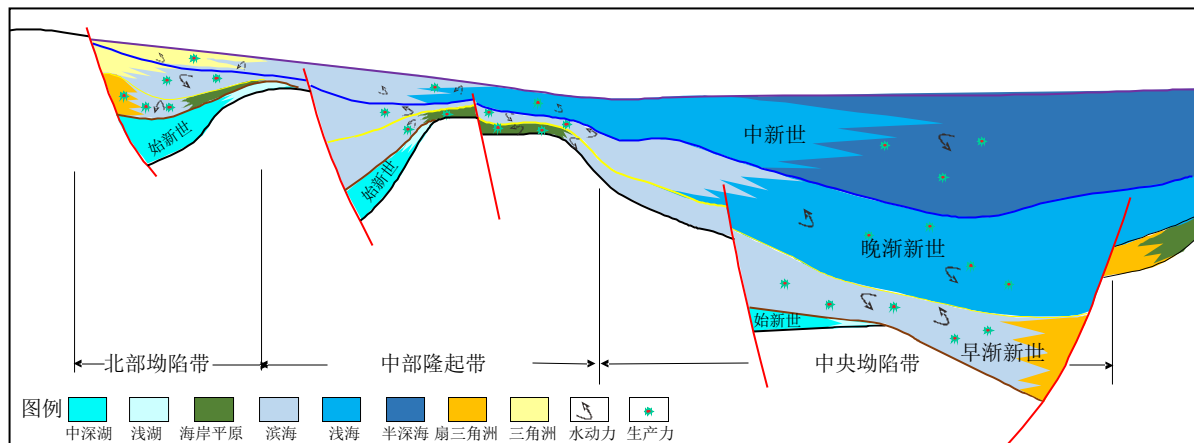


图9 南海北部琼东南盆地新生代烃源岩沉积演化特征及展布

Fig.9 Sedimentation evolution and source-rock distribution in Qiongdongnan Basin

主;中央拗陷,物源充足,底栖藻类也相对发育,是崖城组沉积时期最有利于烃源岩发育的区带。

#### 4.3 中晚渐新世半封闭浅海相陆源烃源岩

崖城-陵水组沉积时期海相沉积范围进一步扩大,限制性海相环境减弱,水动力条件增强,以浅海相与滨海相沉积为主,局部发育扇三角洲。地球化学分析表明该时期气候变冷,古生产力较崖城组时期有所降低;中央拗陷浅海区域底栖藻类较发育,较北部拗陷带、中部隆起带古生产力高,水动力条件相对弱,可发育好烃源岩。

#### 4.4 中新世海相潜在烃源岩

中新世早期三亚组沉积气温达到峰值,随后逐渐下降,中新世海侵范围不断扩大,形成了滨海、浅海以及半深海相沉积环境,中部隆起区水动力条件较强,不利于烃源岩的保存;中央拗陷带外浅海—陆坡半深海区域,水动力相对较弱,底栖藻类发育,仍接受隆起区物源输入,是潜在好烃源岩发育区。

### 5 天然气勘探成果与气源综合分析判识

天然气气组分主要由C<sub>1</sub>—C<sub>7</sub>轻烃组成,一般难以与烃源岩建立直接联系<sup>[25]</sup>。因此,本文通过天然气组分特征及天然气碳同位素这些地球化学“指纹”来解析天然气成因,追踪天然气来源<sup>[11,26]</sup>。琼东南盆地天然气组成以烃类气为主(除宝岛19区高含CO<sub>2</sub>外),组分变化具有规律性,即从北到南,干燥系数逐渐变大,天然气成熟度增高。北部拗陷带及周边如宝岛凹陷北坡、松东凹陷、陵水低凸起发现的天然气,烃类气甲烷含量为69.2%~86.1%,干燥系数(C<sub>1</sub>/ΣC<sub>1-5</sub>)为74%~91%,大多表现为湿气,

且多与凝析油伴生。中央拗陷带如崖南凹陷、深水区乐东-陵水凹陷及松南低凸起,烃类气甲烷含量为82.9%~95.6%,干燥系数(C<sub>1</sub>/ΣC<sub>1-5</sub>)为91%~98%,主要表现为干气(表2)。甲烷碳同位素值是天然气成熟度的良好指标,北部拗陷及相邻的凸起区天然气甲烷碳同位素偏轻,为-48.65‰~-41.66‰,南部中央拗陷带天然气甲烷碳同位素偏重,为-39.69‰~-34.31‰,说明北部天然气演化程度低于南部,这与干燥系数的变化规律一致。琼东南盆地天然气甲烷同系物碳同位素基本表现为正碳同位素系列,即 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$ ,不存在倒转情况,说明这些烷烃气是原生型有机成因气,不存在混源现象。天然气中乙烷碳同位素受烃源岩热演化程度的影响比甲烷同位素小,具有较强的母质继承性,一般煤型气乙烷同位素重于油型气,业内普遍以 $\delta^{13}C_2 - 28\text{‰}$ 作为划分标准<sup>[27-28]</sup>。琼东南盆地天然气乙烷同位素值具有自北向南逐渐变大的规律。依上述标准,琼东南盆地天然气成因可划分为两类,一类具有油型气特征,以宝岛-松东凹陷天然气为代表,乙烷碳同位素为-30.92‰~-28.69‰,均小于-28‰;一类表现为煤型气特征,以乐东-陵水凹陷天然气为代表,乙烷碳同位素较重,均大于-28‰。由此判断北部拗陷带天然气以油型气为主,中央拗陷带则以煤型气为特征,而宝岛凹陷北部断阶带宝岛21区位于宝岛主洼和松涛凸起之间过渡带的位置,同位素恰好位于-28‰附近,介于典型油型气和煤型气之间,推测具有北部拗陷与中央拗陷双向供烃的作用,且更偏油型气特征,其同位素值特征与所处构造位置十分吻合。

琼东南盆地目前的油气发现以气田为主,且大多未能钻遇中央拗陷带深部的主力烃源岩,气源分析主要通过已知天然气来源的崖城13-1气田进

表 2 琼东南盆地主要气田及含油气构造天然气组成与碳同位素特征

Table 2 Natural gas composition and carbon isotope characteristics of major gas fields and hydrocarbon-bearing structures in Qiongdongnan Basin

区带	井号	地层	取样方式	井深/m	烃类气/%		非烃气/%		干燥系数	碳同位素 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$						
					C <sub>1</sub>	C <sub>2-5</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>		C <sub>1</sub> /C <sub>1-5</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	iC <sub>4</sub>	nC <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
松东凹陷	ST24	SY	MDT	2 122.2	74.30	9.80	6.77	7.81	0.88	-47.06	-30.92	-29.96				-7.61
宝岛凹陷北坡	BD13A	MS	DST	1 573~1 580	86.14	10.24	2.46	0.72	0.89	-48.65	-30.53	-31.15				-25.54
	BD13B	MS	MDT	1 967.5	82.48	8.09	6.67	1.18	0.91	-45.53	-30.39	-29.84				-29.33
宝岛凹陷北部断阶	BD21A	LS	DST	4 092.4~4 154	67.14	5.74	0.27	26.55	0.92	-39.46	-28.69	-26.96	-25.89	-26.10		-5.03
	BD21B	LS	MDT	4 268.50	60.38	9.06	2.57	27.71	0.86	-39.83	-29.43	-27.37	-26.24	-26.35		-4.76
陵水低凸起	LS13A	MS	MDT	3 607.8	69.19	24.24	0.63	4.10	0.74	-41.66	-25.41	-24.17	-24.00	-23.20		-12.61
	LS13B	MS	DST	3 776.9~3 786	79.52	15.76	0.53	3.86	0.83	-44.67	-26.49	-25.02	-24.82	-24.46		-7.88
陵水凹陷	LS17A	HL	MDT	3 324.0	93.25	5.79	0.62	0.21	0.94	-36.78	-23.62	-22.17	-21.26	-21.75		-17.76
	LS17B	HL	MDT	3 331.3	91.51	6.01	2.15	0.07	0.94	-37.40	-24.16	-23.21	-22.89	-21.75		-18.08
松南低凸起	YL8A	YC	MDT	2 880.5	95.65	2.81	0.79	0.65	0.97	-44.97	-27.17	-27.04				-12.43
	YL8B	Pre-Tertiary	DST	2 828.8~2 936	95.67	3.30	0.19	0.83	0.97	-43.39	-26.92	-26.76				-2.98
乐东凹陷	YC27	HL	MDT	4 390.0	90.6	2.77	1.30	5.24	0.97	-34.31	-22.55	-19.08	-18.66	-18.35		-9.23
	LS25	HL	MDT	3 760.8	87.89	7.82	1.48	2.20	0.92	-39.69	-25.78	-23.86	-23.56	-23.07		-12.48
崖南凹陷	YC13A	LS	DST	3 658.8~3 701.9	84.18	3.36	1.04	10.79	0.96	-35.50						
	YC13B	LS	DST	3 888.6~3 907.5	86.63	1.81	0.10	11.60	0.98	-35.12						
	YC13C	LS	DST	3 898.3~3 921.3	84.58	4.65	1.76	8.73	0.95	-37.09	-26.29	-27.71	-24.78			
	YC13D	LS	DST	3 901.4~3 938.0	82.96	7.86	0.26	8.33	0.91	-39.99	-24.88	-23.72	-23.84			

行气-气对比或通过天然气伴生凝析油的生标特征来判识。如中央坳陷带乐东凹陷陵水 25 区、陵水凹陷陵水 17 区中央峡谷水道深水天然气田群与浅水区崖城 13-1 气田天然气甲烷同系物碳同位素分布特征基本一致,吻合性较高,表明其具有同源或亲缘关系。崖城 13-1 气田通过烃源岩对比及气源追踪,确证了其主要来自崖南凹陷崖城组煤系烃源岩,而其与深水区乐东凹陷陵水 25 气田及陵水凹陷陵水 17 气田群的这种“指纹特征”的相似性,则充分表明中央坳陷带深水区气田群的天然气与崖城 13-1 气田一样均来自同一下渐新统崖城组煤系烃源岩所提供。北部坳陷带浅水区松涛 24 区和宝岛凹陷北坡宝岛 13 区勘探发现的天然气,其甲烷同系物碳同位素值明显偏轻,与中央坳陷带陵水 17 和陵水 25 气田群甲烷同系物碳同位素分布曲线偏离较大,表明两者烃源岩供给及来源存在明显差异,推测松涛 24 区和宝岛 13 区天然气烃源岩供给可能主要来自始新统湖相烃源岩的贡献。另外,宝岛凹陷北部断阶带宝岛 21 气田,由于处在北部坳陷浅水区与中央坳陷带深水区之过渡区,甲烷同系

物碳同位素分布特征介于以上两者之间,推测其具有一定的混源特征(图 10)。

大量地球化学分析结果表明,琼东南盆地天然气与伴生凝析油轻烃指纹变化特征基本一致,表明油/气具有成因联系,即油/气同源,故可以采用以气藏伴生凝析油中生物标志化合物作为“桥梁”的方法,分析天然气生源差异,并追踪其气源<sup>[29-31]</sup>。如北部坳陷带 Y9 井、ST24 井原油生物标志化合物含丰富的 C<sub>30-4</sub> 甲基甾烷(图 11),与相邻盆地已证实的始新统中深湖相烃源岩之原油特征完全一致或类似,同时 ST24 区、BD13 区井天然气组成及碳同位素特征也表现出典型的油型气特点,则充分表明了盆地北部坳陷带油气主要来自始新统中深湖相烃源岩的贡献。中央坳陷带深水气藏伴生凝析油与北部坳陷带浅水区原油的萜烷分布特征对比则进一步证实了两个区域的烃源岩供给差异明显,北部坳陷带原油基本不存在煤系生源的标志物——双杜松烷(W、T)、奥利烷(OL),而中央坳陷带气藏伴生凝析油,则富含双杜松烷和奥利烷等煤系标志物。如图 11 所示,中央坳陷带西北部 YC13 凝析油

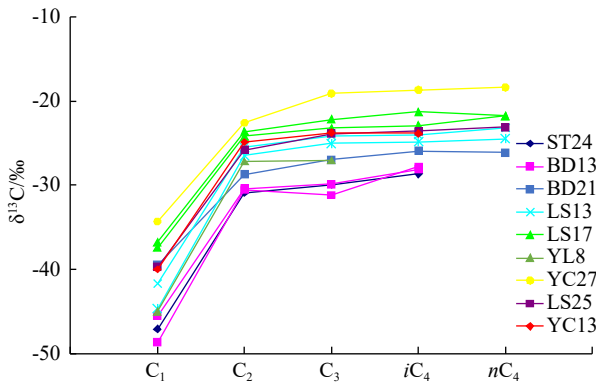


图 10 琼东南盆地浅水-深水主要气田群天然气碳同位素指纹对比

Fig. 10 Carbon isotope fingerprint comparison of natural gas in main shallow-deep water gas fields in Qiongdongnan Basin

萜烷生物标志物中双杜松烷(W、T)及奥利烷(OL)异常丰富,这些化合物代表了陆生高等植物尤其是煤系生源母质的重大贡献,且可能主要来源于该区渐新统崖城组海岸平原相之煤系烃源岩。再如中央拗陷带西南部、中部及东部的陵水凹陷LS17、乐东凹陷LS25和宝岛凹陷BD21凝析油生物标志化合物特征非常相似,其萜烷构成及分布中同样富含W、T、OL这三种陆源生物标志物,虽然其相对丰度比YC13凝析油有所降低,但其总体特征没有改变,仍然显示了W、T、OL这三种煤系标志物异常丰富的特点。另外,在原油与凝析油的甾烷系列化合物分布特征上也可看出(图11),崖南凹陷YC13凝析油C<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub>甾烷含量较低,但W、T煤系

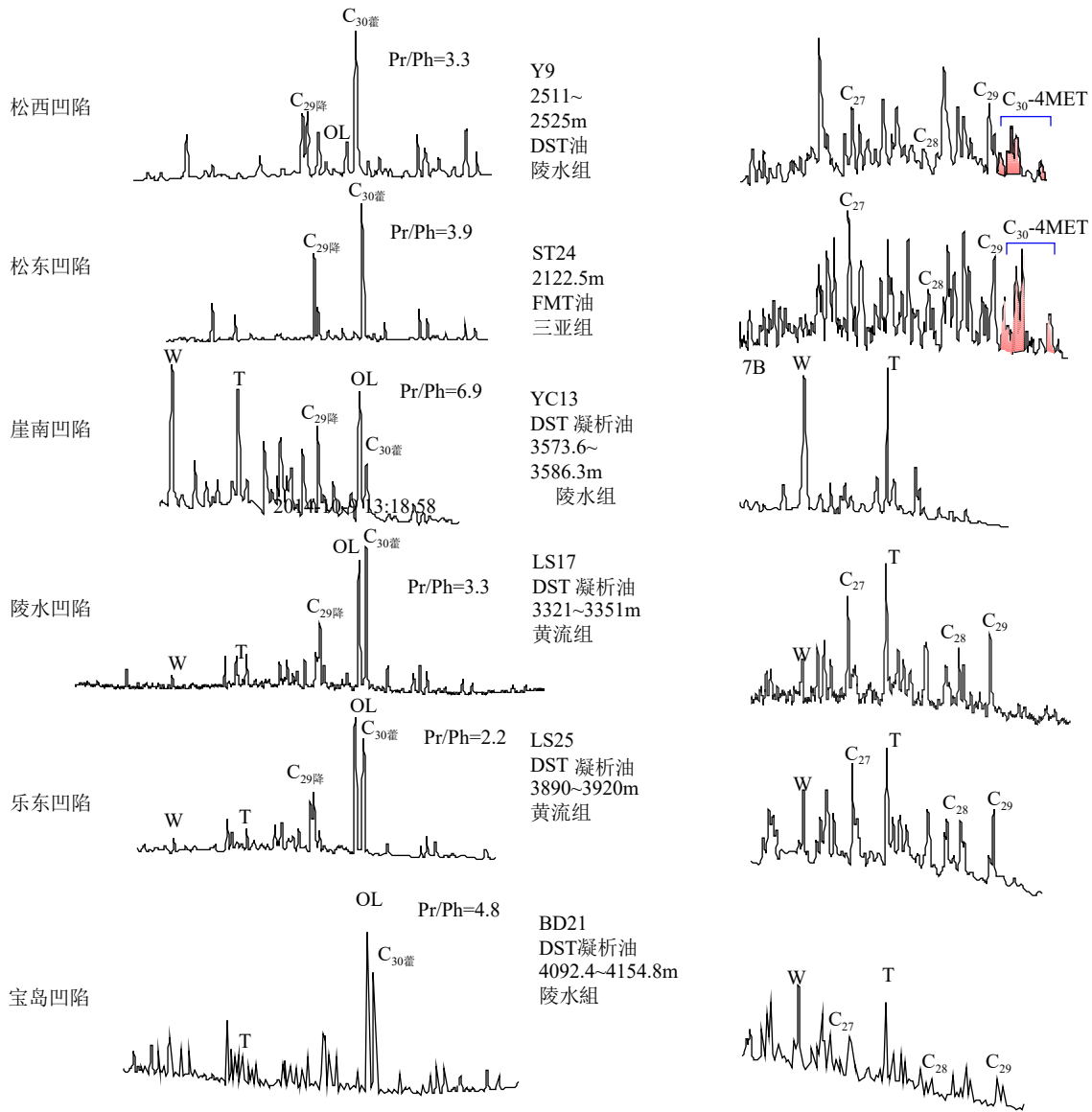


图 11 琼东南盆地不同区域(浅水—深水)原油与气藏伴生凝析油甾萜类生标特征对比

Fig. 11 Comparison in characteristics of biological indicators of steroidal and terpene in gas associated condensate in different areas (shallow-deep water) of Qiongdongnan Basin

标志物占绝对优势, 而相邻的深水区乐东凹陷 LS25 和陵水凹陷 LS17 及宝岛凹陷 BD21 凝析油  $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$  甾烷含量峰值有所增加, “W、T”煤系标志物仍然异常丰富, 很显然两者的差异主要在于其甾烷构成与分布,  $C_{27}$  规则甾烷含量在深水区较高, 表明了中央拗陷带深水区尚有藻类等低等水生生物的贡献, 亦说明中央拗陷带西南部乐东凹陷和中部陵水凹陷气藏及伴生凝析油的烃源岩供给与其西北部的崖南凹陷尚存在一定的差异。亦即中央拗陷带天然气的烃源岩供给, 虽都来自渐新统崖城组煤系及浅海相泥岩之烃源岩, 但其生源母质存在一定的差异, 崖南凹陷的 YC13 煤系凝析油气主要来自崖城组海岸平原煤系地层, 而陵水凹陷 LS17、乐东凹陷 LS25 及宝岛凹陷 BD21 天然气则主要来自崖城组海陆过渡相与海相陆源生源母质的共同贡献。

## 6 结论与认识

(1) 琼东南盆地烃源岩发育于始新世、渐新世、中新世 3 个时期, 其中渐新统海陆过渡相—半封闭浅海相陆源烃源岩为盆地最重要烃源岩类型, 其有机质丰度高, 在断陷期分布广; 中新统有机质丰度整体中等或偏差, 局部区域有机质丰度较高, 在深水区沉积充填厚度大、埋藏深, 已达成熟门槛, 是盆地潜在的烃源岩; 始新统湖相源岩, 虽然未直接钻遇, 但北部拗陷带钻遇油气地化特征表明其主要来自始新统湖相烃源岩的贡献, 因此其属于该区重要的烃源岩类型。

(2) 琼东南盆地主要烃源岩可细分为 4 种类型: 即始新统中深湖相烃源岩、早渐新统崖城组海陆过渡相烃源岩、中晚渐新统崖城-陵水组半封闭浅海相烃源岩及中新统半深海及深海相潜在烃源岩。综合判识表明渐新统烃源岩形成条件整体上要优于中新统潜在烃源岩, 而最有利的烃源岩发育区带主要为南部中央拗陷带深水区, 其次为北部拗陷带浅水区。

(3) 琼东南盆地北部拗陷带及邻区气田群及含油气构造的天然气具有油型气特征, 而其它区域即北部拗陷带以南的广大区域(中央拗陷带、南部隆起带及南部拗陷带等)气田群之天然气均属煤型气。北部拗陷带浅水区油气可能主要来自始新统湖相烃源岩的贡献, 而南部中央拗陷带浅水(局部)及深水气田群天然气则主要来自渐新统崖城组煤系烃源岩及半封闭浅海相陆源烃源岩。

## 参考文献 (References)

- [1] 何家雄, 张伟, 卢振权, 等. 南海北部大陆边缘主要盆地含油气系统及油气有利勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(6): 943-959. [HE Jiaxiong, ZHANG Wei, LU Zhenquan, et al. Petroleum system and favorable exploration directions of the main marginal basins in the northern South China Sea [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(6): 943-959.]
- [2] 何家雄, 陈胜红, 刘海龄, 等. 南海北部边缘莺-琼盆地油气资源前景及有利勘探方向分析[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(4): 492-498. [HE Jiaxiong, CHEN Shenghong, LIU Hailing, et al. Petroleum resource potential and advantageous exploration targets in Ying-Qiong Basin, northern margin of South China Sea [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(4): 492-498.]
- [3] 何家雄, 李福元, 王后金, 等. 南海北部大陆边缘深水盆地成因机制与油气资源效应[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(3): 1-11. [HE Jiaxiong, LI Fuyuan, WANG Houjin, et al. Genetic mechanism of deepwater basins and their effects on oil and gas resources on the continental margin of the northern South China Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(3): 1-11.]
- [4] 李绪深, 王振峰, 等. 琼东南盆地深水区烃源岩地球化学特征与天然气潜力[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(4): 1-7. [HUANG Baojia, LI Xushen, WANG Zhenfeng, et al. Source rock geochemistry and gas potential in the deep water area, Qiongdongnan basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(4): 1-7.]
- [5] 梁刚, 甘军, 李兴, 等. 琼东南盆地浅水区与深水区烃源岩热演化差异性影响因素研究[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(1): 69-74. [LIANG Gang, GAN Jun, LI Xing, et al. Influential factors of thermal evolution difference of source rocks in shallow and deep water areas of southeastern Hainan Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(1): 69-74.]
- [6] 杨计海, 黄保家, 杨金海. 琼东南盆地深水区松南低凸起天然气成藏条件与勘探潜力[J]. *中国海上油气*, 2019, 31(2): 1-10. [YANG Jihai, HUANG Baojia, YANG Jinhai. Gas accumulation conditions and exploration potentials of natural gases in Songnan low uplift, deep water area of Qiongdongnan basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(2): 1-10.]
- [7] 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. Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1997: 1-510.]
- [8] 李绪宣, 钟志洪, 董伟良, 等. 琼东南盆地古近纪裂陷构造特征及其动力学机制[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(6): 713-721. [LI Xuxuan, ZHONG Zhihong, DONG Weiliang, et al. Paleogene rift structure and its dynamics of Qiongdongnan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(6): 713-721.]
- [9] 张功成, 杨少坤, 等. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 8-52. [ZHU Weilin, ZHANG Gongcheng, YANG Shaokun, et al. Natural Gas Geology of Continental Margin Basins of the Northern South China Sea [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 8-52.]

- [10] 黄保家, 王振峰, 梁刚. 琼东南盆地深水区中央峡谷天然气来源及运聚模式[J]. 中国海上油气, 2014, 26(5): 8-14. [HUANG Baojia, WANG Zhenfeng, LIANG Gang. Natural gas source and migration-accumulation pattern in the central canyon, the deep water area, Qiongdongnan basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(5): 8-14.]
- [11] 梁刚, 甘军, 李兴. 琼东南盆地陵水凹陷天然气成因类型及来源[J]. 中国海上油气, 2015, 27(4): 47-53. [LIANG Gang, GAN Jun, LI Xing. Genetic types and origin of natural gas in Lingshui sag, Qiongdongnan basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(4): 47-53.]
- [12] 王振峰, 何家雄. 琼东南盆地中新统油气运聚成藏条件及成藏组合分析[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(2): 107-115. [WANG Zhenfeng, HE Jiaxiong. Miocene hydrocarbon's transferring and collecting condition and reservoir combination analysis in Qiongdongnan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(2): 107-115.]
- [13] 王元, 李贤庆, 王刚, 等. 莺琼盆地中新统海相烃源岩地球化学特征及生烃潜力评价[J]. 现代地质, 2018, 32(3): 500-510. [WANG Yuan, LI Xianqing, WANG Gang, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of Miocene marine source rocks in the Ying-Qiong Basin [J]. Geoscience, 2018, 32(3): 500-510.]
- [14] 李春荣, 陈开远. 潜江凹陷潜江组元素演化特征及其古气候意义[J]. 石油地质与工程, 2007, 21(6): 18-21. [LI Chunrong, CHEN Kaiyuan. Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of elements in the Qianjiang formation, Qianjiang depression [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21(6): 18-21.]
- [15] Francois R, Honjo S, Manganini S J, et al. Biogenic barium fluxes to the deep sea: implications for paleoproductivity reconstruction [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9(2): 289-303.
- [16] Dymond J, Suess E, Lyle M. Barium in deep-sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity [J]. Paleoceanography, 1992, 7(2): 163-181.
- [17] Murray R W, Leinen M. Scavenged excess aluminum and its relationship to bulk titanium in biogenic sediment from the central equatorial Pacific Ocean [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(20): 3869-3878.
- [18] 韦刚健, 刘颖, 李献华, 等. 南海沉积物中过剩铝问题的探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1): 23-25. [WEI Gangjian, LIU Ying, LI Xianhua, et al. Excess Al in the sediments from South China Sea [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(1): 23-25.]
- [19] 陈亮, 刘春莲, 庄畅, 等. 三水盆地古近系下部湖相沉积的稀土元素地球化学特征及其古气候意义[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1155-1162. [CHEN Liang, LIU Chunlian, ZHUANG Chang, et al. Rare earth element records of the lower paleogene sediments in the Sanshui Basin and their paleoclimate implications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1155-1162.]
- [20] 苗建宇. 新疆北部主要盆地二叠系烃源岩沉积环境与生烃特征[D]. 西北大学博士学位论文, 2001: 65-98. [MIAO Jianyu. The depositional environment of Permian system hydrocarbon source rocks and its potential hydrocarbon generating characteristics in major basins in North Xinjiang[D]. Doctor Dissertation of Northwest University, 2001: 65-98.]
- [21] 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清, 等. 南海地质[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 315-400. [LIU Zhaoshu, ZHAO Huanting, FAN Shiqing, et al. Geology of the South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2002: 315-400.]
- [22] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 15-22. [ZHAO Yiyang, YAN Mingcai. Chemistry of Sediments of the China Shelf Sea[M]. Beijing: Science Press, 1994: 15-22.]
- [23] 王争鸣. 缺氧沉积环境的地球化学标志[J]. 甘肃地质学报, 2003, 12(2): 55-58. [WANG Zhengming. Geochemical indicators for diagnosing anoxic sedimentary environment [J]. Acta Geologica Gansu, 2003, 12(2): 55-58.]
- [24] 秦建中, 腾格尔, 付小东. 海相优质烃源层评价与形成条件研究[J]. 石油实验地质, 2009, 31(4): 366-372, 378. [QIN Jianzhong, TENGGER, FU Xiaodong. Study of forming condition on marine excellent source rocks and its evaluation [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(4): 366-372, 378.]
- [25] Ashan S A, Karlsen D A, Mitchell A W, et al. Inter and intrafield hydrocarbon compositional variations in the Ula and the Gyda fields (Central Graben-North Sea)-Implication for understanding the controls on hydrocarbon distribution within and between these fields [J]. Organic Geochemistry, 1998, 29(1-3): 429-448.
- [26] 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 Yingzhao, GAN Jun, XU Xinde, 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.]
- [27] 戴金星, 邹才能, 李伟, 等. 中国大气田及其气源[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 50-62. [DAI Jinxing, ZOU Caineng, LI Wei, et al. Giant Coal-Derived Gasfields and Their Gas Sources in China[M]. Beijing: Science Press, 2014: 416-420.]
- [28] 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 Gang, GAN Jun, YOU Junjun, 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.]
- [29] 何家雄, 马文宏, 祝有海, 等. 南海北部边缘盆地天然气成因类型及成藏时间综合判识与确定[J]. 中国地质, 2011, 38(1): 145-160. [HE Jiaxiong, MA Wenhong, ZHU Youhai, et al. Integrated identification and determination of genetic types and accumulation time in the marginal basin of northern South China Sea [J]. Geology in China, 2011, 38(1): 145-160.]
- [30] 何家雄, 姚永坚, 刘海龄, 等. 南海北部边缘盆地天然气成因类型及气源构成特点[J]. 中国地质, 2008, 35(5): 1007-1016. [HE Jiaxiong, YAO Yongjian, LIU Hailing, et al. Genetic types of natural gas and characteristic of the gas source composition in marginal basins of the northern South China Sea [J]. Geology in China, 2008, 35(5): 1007-1016.]
- [31] 何家雄, 马文宏, 祝有海, 等. 南海北部边缘盆地天然气成因类型及运聚规律与勘探新领域[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(4): 1-10. [HE Jiaxiong, MA Wenhong, ZHU Youhai, et al. Genetic types, migration and accumulation of gas in the north marginal basins of South China Sea and new exploration targets [J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(4): 1-10.]