

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.091>



莺歌海盆地浅海环境下烃源岩有机质形成机制

徐新德, 杨计海, 刘海钰, 郭潇潇, 熊小峰, 梁刚

中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要: 为了解莺歌海盆地海相烃源岩有机质形成机制,本研究引入地球生物学方法正演烃源岩形成过程,弥补盆地样品条件的不足,再结合有机地球化学方法,综合研究莺歌海盆地海相烃源岩有机质形成机制,建立烃源岩发育模式。研究认为:莺歌海盆地中新统发育浅海相烃源岩,有机质类型以 II_2 -III型为主,为混合型生源母质,现今凹陷内大部分烃源岩处于高熟-过成熟生气阶段。海相烃源岩以古生产力和保存条件为主要控制因素,平面上,莺歌海盆地东方区中新统烃源岩发育条件优于乐东区;纵向上,梅山组可能是有利的烃源层段。研究成果为正确认识莺歌海盆地烃源岩形成机制并准确评价其资源潜力提供了重要依据。

关键词: 莺歌海盆地;中新统;烃源岩;形成机制;发育模式;石油地质。

中图分类号: P588

文章编号: 1000-2383(2019)08-2643-11

收稿日期: 2019-01-10

Formation Mechanism of Organic Matter in Source Rocks under Marine Environment in Yinggehai Basin

Xu Xinde, Yang Jimei, Liu Haiyu, Guo Xiaoxiao, Xiong Xiaofeng, Liang Gang

Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd., Zhanjiang 524057, China

Abstract: In order to find out the formation mechanism of organic matter in marine source rocks of Yinggehai Basin, the geobiological methods were introduced to evaluate the dynamic process of the hydrocarbon source rocks, which can make up for the poor sample conditions of the basin. Combined with organic geochemical methods, the formation mechanism of organic matter in marine source rocks of Yinggehai Basin was studied comprehensively and the development model of source rocks was established. The study shows that shallow marine source rocks are developed in the Miocene of Yinggehai Basin. The organic matter type is mainly type II_2 -III, which is the mixed source rock. Most of the Miocene source rocks in the depression are in the high-mature to over-mature stage. Marine source rocks are mainly controlled by paleoproductivity and preservation conditions. In plane, the development conditions of Miocene source rocks in the Dongfang area of Yinggehai Basin are better than those in Ledong area. Vertically, favorable source rocks maybe distribute in Meishan formation. The research results provide an important basis for recognizing the formation mechanism of source rocks and accurately evaluating their resource potential in the Yinggehai Basin.

Key words: Yinggehai Basin; Miocene; marine source rock; formation mechanism; development model; petroleum geology.

基金项目: 国家“十三五”重大科技专项“莺琼盆地高温高压天然气富集规律与勘探开发关键技术(三期)”(No. 2016ZX05024-005).

作者简介: 徐新德(1970-),男,高级工程师,硕士,主要从事油气地球化学与成藏研究工作。ORCID: 0000-0002-3908-9896. E-mail: xuxd@cnooc.com.cn

引用格式: 徐新德, 杨计海, 刘海钰等, 2019. 莺歌海盆地浅海环境下烃源岩有机质形成机制. 地球科学, 44(8):2643-2653.

0 引言

莺歌海盆地主要产气区分别位于莺歌海凹陷中央底辟带的东方区和乐东区,已获多个商业性气田发现.目前在浅层已发现X1-1、X15-1、Z22-1等气田群,中深层勘探发现了X13-1、X13-2、Z10-1等高温高压气田和含气构造.尽管莺歌海盆地勘探多年,发现多个大中型气田,前人关于莺歌海盆地天然气成因(刘铁树和王俊兰,1994;何家雄等,2000;童传新等,2015;吴红烛等,2015;郭潇潇等,2017a)、成藏(徐新德等,2014;谢玉洪等,2015;张迎朝等,2015;郭潇潇等,2017b;熊小峰等,2017)方面做了许多工作,但是关于烃源岩的研究有限,主要集中于烃源岩地球化学特征(邓鸣放等,1990;王元等,2018)和烃源岩的演化特征(黄保家等,2002,2010;熊小峰等,2016a,2016b),而关于烃源岩发育机制方面研究更是很少涉及.此外,由于莺歌海盆地探井多大多数位于盆地边缘或斜坡带,直接揭示海相烃源岩的钻井较少,制约了海相烃源岩品质及生烃潜力的评价,从而影响了对盆地勘探潜力的准确评估.为了弥补样品条件不足的限制,本次研究引入烃源岩地球生物学方法正演烃源岩形成过程中的古气候、古生产力和古沉积环境,并结

合有机地球化学方法补充验证,深入剖析海相烃源岩有机质形成机制,建立烃源岩发育模式,并首次预测莺歌海盆地有利烃源岩发育区带和层位,本次研究工作可为下一步的资源评价提供重要理论支撑,对该区进一步勘探具有重要的指导意义.

1 区域地质背景

莺歌海盆地位于海南岛以西、中南半岛以东海域,盆地整体为菱形,呈北西-南东向展布,是一个年轻的、快速沉降的、沉积深厚的海相新生代盆地,具有异常高温、高压,泥底辟构造非常发育的特点(李思田等,1997,1998;龚再升和李思田,2004;崔涛等,2008).该盆地可划分为莺歌海凹陷、莺东斜坡、莺西斜坡、河内凹陷等多个一级构造单元(李思田等,1997)(图1).莺歌海盆地先后经历了断陷期和坳陷期2个演化阶段.钻遇的新生代地层由老到新为古近系渐新统崖城组和陵水组,新近系中新统三亚组、梅山组和黄流组以及上新统莺歌海组和第四系乐东组(图1).前人研究表明,莺歌海盆地裂后热沉降形成的中央拗陷广泛发育下中新统三亚组和中中新统梅山组浅海相烃源岩,这种烃源岩为碎屑岩,沉积于半封闭浅海环境,有机质主要是生气

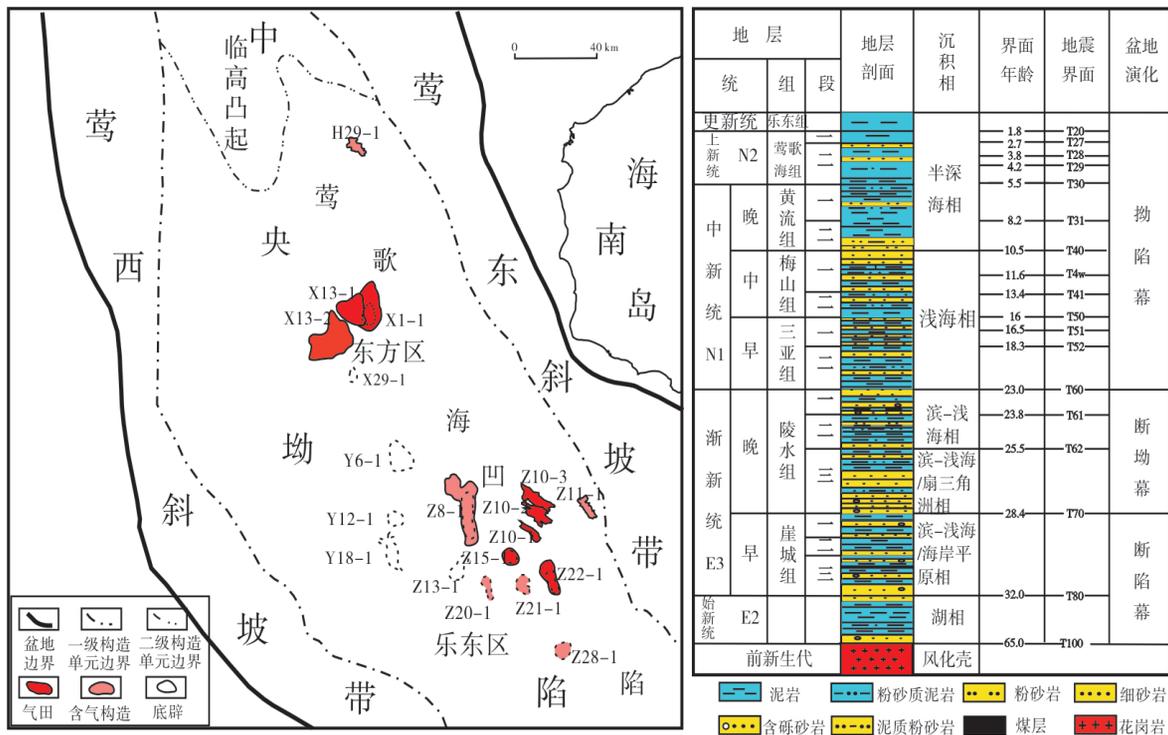


图1 莺歌海盆地构造区划分图及地层柱状图
Fig.1 Sketch map and stratigraphic column map of Yinggehai Basin

表 1 莺歌海盆地梅山、三亚组烃源岩有机质丰度统计表

Table 1 Statistical table of organic matter abundance of source rocks of Meishan and Sanya formations in Yinggehai Basin

层位	TOC (%)	S_1+S_2 (mg/g)	氯仿沥青“A”(%)	氢指数 HI(mg/g)	成熟度 R_o (%)	类型
梅山组	0.10~3.17	0.02~7.07	0.002~0.098	7~465	0.49~0.75	II ₂ 型和 III 型
	0.61(192)	0.94(182)	0.046(38)	127(137)	0.66(27)	
三亚组	0.20~1.17	0.06~2.78	0.014 8~0.065 9	13~456	0.61~0.79	II ₂ 型和 III 型
	0.59(50)	0.79(50)	0.040 2(11)	106(42)	0.72(7)	

注:表中数据格式为最小值—最大值/平均值(样品数).

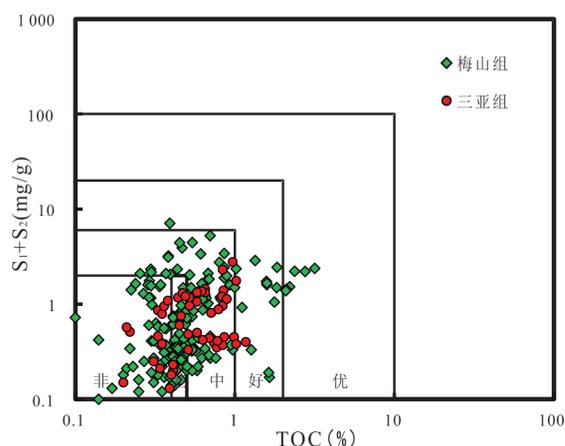


图 2 莺歌海盆地中新统烃源岩有机质丰度评价

Fig. 2 Assessment of organic matter abundance of Miocene source rocks in the Yinggehai Basin

为主的陆源高等植物,盆地中央低等水生生物的含量略有升高(邓鸣放等,1990;黄保家等,2002,2010).梅山组、黄流组及以上地层发育浅海或半深海背景下的陆架砂岩、海底扇沉积和泥岩,形成良好的储盖组合(谢玉洪等,2015;熊小峰等,2017).

2 中新统海相烃源岩特征

2.1 烃源岩有机质丰度、类型与成熟度

莺歌海盆地发育中新统梅山组和三亚组两套主力烃源岩.钻遇中新统地层的探井大多数位于盆地边缘或斜坡带,故有机质丰度总体不高,绝大多数烃源岩样品 TOC 以小于 1.0% 为主.从已钻井资料(表 1 和图 2)来看,莺歌海盆地梅山组烃源岩 TOC 分布在 0.14%~3.17%,平均值 0.61%;三亚组烃源岩 TOC 分布在 0.20%~1.17%,平均值 0.59%.梅山组、三亚组烃源岩生烃潜力 S_1+S_2 均较低,其中梅山组样品的 S_1+S_2 分布在 0.02~7.07 mg/g,平均值 0.94 mg/g;三亚组样品 S_1+S_2 分布在 0.06~2.78 mg/g,平均值 0.79 mg/g;梅山组和三亚组烃源岩氯

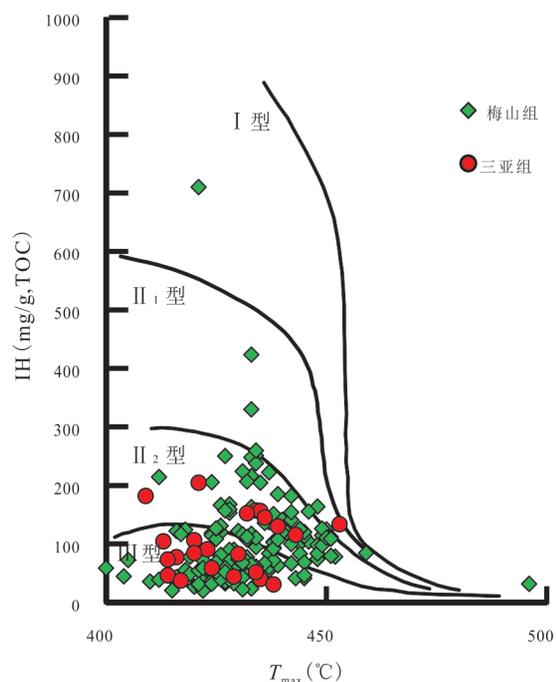


图 3 莺歌海盆地中新统烃源岩有机质类型划分

Fig. 3 Classification of organic matter types of Miocene source rocks in the Yinggehai Basin

仿沥青“A”含量总体较低,平均含量均小于 0.05%,其中梅山组烃源岩样品氯仿沥青“A”含量介于 0.002%~0.098%,平均值为 0.046%;三亚组样品介于 0.014 8%~0.065 9%,平均值为 0.040 2%.梅山组和三亚组烃源岩氢指数也较低,整体小于 300 mg/g,其中梅山组 HI 值介于 7~465 mg/g,平均值为 127 mg/g;三亚组 HI 分布在 13~456 mg/g,平均值为 106 mg/g.相比较而言,梅山组烃源岩的有机质丰度要稍高于三亚组.

根据岩石热解参数分析结果,莺歌海盆地梅山组、三亚组烃源岩的氢指数 HI 小于 300 mg/g, T_{max} 集中分布在 420~460 °C,表现为 II₂-III 型干酪根类型(图 3).

从烃源岩样品的实测镜质组反射率 R_o 来看,莺

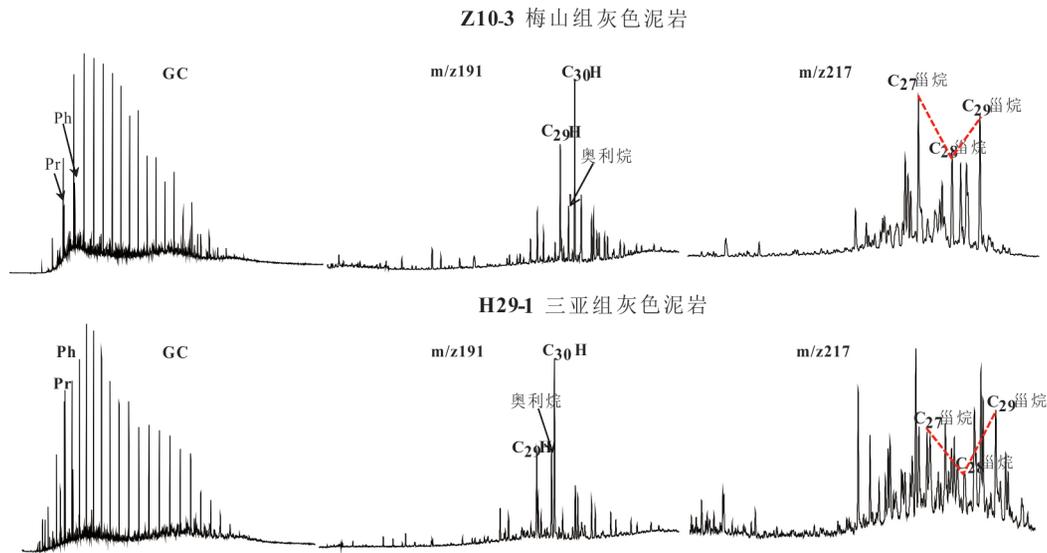


图 4 莺歌海盆地中新统烃源岩饱和色谱及 $m/z191$ 、 $m/z217$ 质量色谱

Fig.4 The chromatogram of the saturated hydrocarbon, mass chromatogram of terpenes($m/z191$)and steranes ($m/z217$) from Miocene source rocks in the Yinggehai Basin

莺歌海盆地中新统烃源岩样品处于成熟阶段(表 1),盆地凸起带及凹陷斜坡带有机质热演化程度要低于凹陷中央的有机质热演化程度,凹陷中央带成熟门限($R_o=0.6\%$)深度约 2 800 m.

2.2 生物标志物特征

莺歌海盆地中新统梅山组、三亚组海相烃源岩正构烷烃的碳数范围为 $nC_{13}\sim nC_{33}$,谱图特征以前峰型分布居多, $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 值介于 0.7~16.3. Pr/Ph 值分布在 0.31~5.06,平均值为 1.97,暗示其生烃母质沉积于弱氧化-弱还原环境.

$m/z191$ 图谱(图 4)显示,梅山、三亚组海相烃源岩含有丰富的五环三萜烷,贫三环萜和四环萜,三环萜烷/藿烷为 0.04~0.84,平均值为 0.19. $C_{31}\sim C_{35}$ 升藿烷系列组成中, C_{35} 升藿烷相对含量极低, $C_{35}/C_{31}\sim C_{35}$ 升藿烷比值为 0.03~0.09,同样反映出烃源岩沉积于弱氧化-弱还原的沉积环境.在五环三萜烷中,普遍检测到源于陆源高等植物的奥利烷,奥利烷/ C_{30} 藿烷比值为 0.16~1.02,绝大多数样品该比值大于 0.2,表明陆源高等植物对其有重要贡献.

梅山、三亚组海相烃源岩规则甾烷 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 呈不对称的“V”型分布(图 4), $C_{27}\sim C_{29}$ 规则甾烷组成中, C_{27} 甾烷相对含量约为 28%~48%, C_{29} 甾烷相对含量为 33%~44%, C_{27}/C_{29} 甾烷比值为 0.50~1.04,说明其生源构成既有陆源高等植物输入亦有低等水生生物贡献.此外,菌藻甾萜类/陆源萜类比值可反映低等生物生源和陆源高等植物生源的相

对比(王元等, 2018),梅山组、三亚组烃源岩该比值为 0.49~1.45,平均 0.86,由此看来,莺歌海盆地梅山组和三亚组烃源岩母质输入中陆源高等植物生源的贡献要高于低等生物生源的贡献.

C_{29} 甾烷 - 20S/(20S+20R) 和 C_{29} 甾烷 - $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 是两个常用的成熟度参数.研究区梅山、三亚组海相烃源岩样品的 C_{29} 甾烷 - 20S/(20S+20R) 比值总体上介于 0.27~0.52, C_{29} 甾烷 - $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 比值介于 0.29~0.60,表明盆地中新统烃源岩处于成熟阶段.

3 生物繁衍形成机制

有机质繁衍以及有机质保存条件是决定烃源岩发育的关键因素,而这两大因素从根本上又取决于烃源岩发育期的古气候、古生产力、古氧相、沉积演化以及海平面变化等因素.

3.1 生物繁衍繁衍条件

3.1.1 古气候 古气候条件通过影响水生和陆生生物的生长,为盆地烃源岩形成提供足够的原地水生或者异地陆源有机质的供给,从而可以间接反映古生产力.前人(徐增连等, 2017; 殷杰等, 2017)利用蕨类孢子、裸子类和被子类花粉的生长环境来判断气候特征,蕨类植物喜好温暖湿润的环境,而裸子类花粉中的麻黄粉属是早生植物的代表.已钻井孢粉资料统计表明,莺歌海盆地中新统孢粉整体以被子植物和蕨类植物孢粉为主,裸子植物花粉丰度

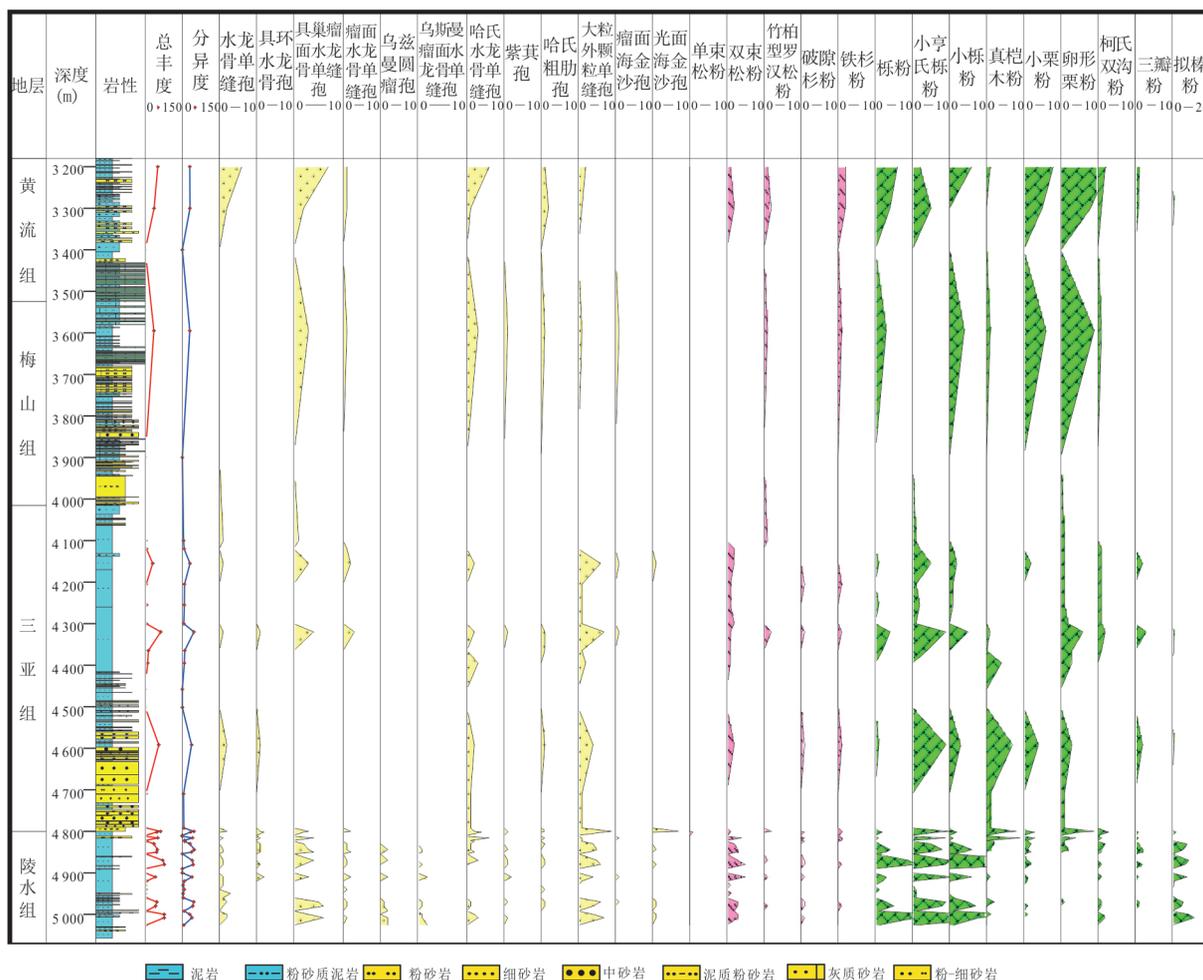


图 5 莺歌海盆地 Z11-1-1 井孢粉分布

Fig.5 Variation of the sporopollen in Well Z11-1-1

较低,且蕨类孢子含量与裸子花粉含量的比值多大于 1,说明气候条件更接近于蕨类生长的湿润气候条件.植被成分以阔叶类、针叶类和草本类较常见,生长在热带海湾红树林花粉较为发育(蒋仲雄等,1994),说明中新世时期气候类型以热带—亚热带、湿润的气候条件为主.

然而,蒋仲雄等(1994)研究认为研究区不同时期孢粉组合特征存在差异.以 Z11-1-1 井为例,三亚组出现了较多的桉木粉和双束松粉(见图 5),指示偏冷偏干的气候;梅山组以被子植物和蕨类植物孢粉为主,优势属种为卵形栗粉和水龙骨单缝孢,指示温暖湿润气候.因此相比较而言,梅山组沉积期的气候比三亚组时期的更为温暖湿润,更有利于烃源岩的发育.

3.1.2 生源构成与古生产力 上文生物标志物特征反映出莺歌海盆地梅山组和三亚组烃源岩具有混合母源输入特征,且陆源高等植物生源的贡献比

例要高于低等生物生源的贡献.此外,莺歌海盆地中新统海相烃源岩发育时期,浮游藻类等含量很少,海相沟鞭藻含量也较少,木本花粉和蕨类孢子含量可高达 90% 以上,微体化石中的孢粉含量明显大于藻类含量,表明盆地中新统海相烃源岩有机质主要来源于陆源母质.

有机岩石学特征是判别烃源岩有机质类型的重要手段(李贤庆等,2002).从烃源岩显微组成(不包含矿物沥青基质)特征来看,莺歌海盆地中新统烃源岩镜质组相对含量最高(50%~100%,均值 82%),中新统样品点都落在了三角图(图 6)偏镜质组一端(镜质组 > 50%),其腐泥组+壳质组的相对含量变化在 5.8%~40.0%,平均值为 23.2%;惰质组相对含量分布在 11.10%~42.85%,平均值为 21.00%,说明莺歌海盆地中新统烃源岩有机显微组成主要以镜质组为主,有机质类型偏向于腐殖型.

中新统烃源岩发育期,在温暖湿润的气候条件

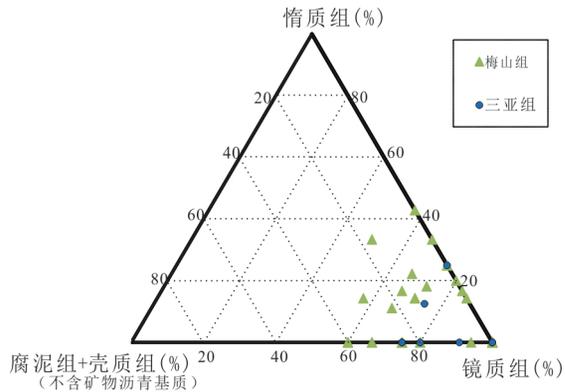
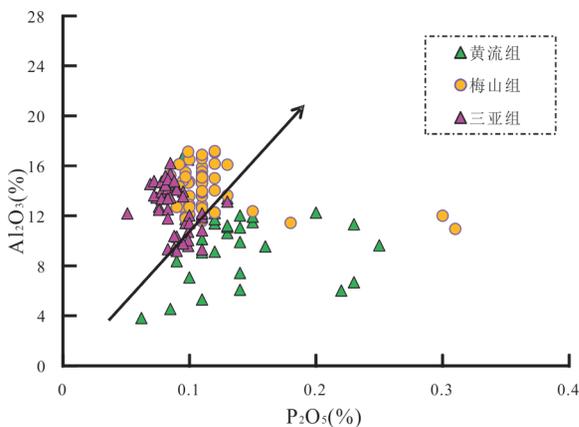


图6 莺歌海盆地中新统烃源岩显微组成三角图

Fig.6 Ternary diagram of maceral composition of Miocene source rocks in the Yinggehai Basin

下,海南岛和红河物源充足,河水携带大量的陆源高等植物碎屑、矿物进入海域,为中新统烃源岩发

图7 莺歌海盆地中新统烃源岩主量元素 Al_2O_3 与 P_2O_5 交汇图Fig.7 Intersection map of major elements Al_2O_3 and P_2O_5 of Miocene source rocks in Yinggehai Basin

育提供充足的有机质和基本的矿物质组分.前人认为无机元素的 Al_2O_3 和 P_2O_5 是代表陆源碎屑矿物供给和营养元素输入的重要指标,可以用来定性反应古生产力 (Engstrom and Wright, 1984; Schindler *et al.*, 2008). 一般来说,优质烃源岩具有较一般烃源岩更多的 P_2O_5 和 Al_2O_3 含量.从图7中可以看出,中新统的梅山组烃源岩有更多的 P_2O_5 和 Al_2O_3 含量,反映梅山组的古生产力较高,该结论可通过上文有机质丰度的差异得到印证.

3.2 有机质保存条件

3.2.1 古氧相 由于氧化还原环境的变化对有机质的保存具有很大的影响,因此进行古氧相的分析

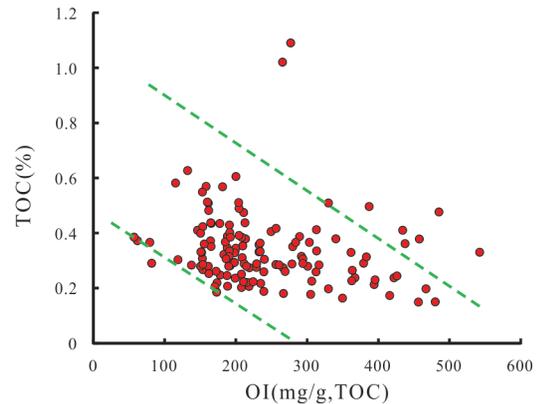


图8 莺歌海盆地黄流组海相泥岩 TOC 与氧指数的相关图

Fig.8 Correlation diagram of organic matter abundance and oxygen index of marine mudstone in the Huangliu formation, Yinggehai Basin

是烃源岩评价的基础.姥鲛烷/植烷 (Pr/Ph) 比值是最常用的沉积环境判别指标,一般认为还原环境中 Pr/Ph 比值较低,而在氧化环境中 Pr/Ph 比值较高 (Peters *et al.*, 2005). 莺歌海盆地中新统烃源岩主要发育于滨浅海沉积环境,烃源岩样品 Pr/Ph 值分布在 0.31~5.06 之间,平均值为 1.97,绝大多数样品的 Pr/Ph 比值为 1~2,具有姥鲛烷优势,指示沉积环境主要为弱氧化-弱还原环境.

沉积岩中的特定矿物(如草莓状黄铁矿)也可以反推当时的沉积环境. Bond and Wignall (2010) 提出还原的沉积水体中形成的草莓状黄铁矿粒径较小,缺氧环境下粒径多小于 $5 \mu m$. 钻井资料揭示,莺歌海盆地烃源岩草莓状黄铁矿平均粒径为 $5.33 \sim 13.80 \mu m$,均值 $8.95 \mu m$,粒径整体偏大,反映盆地整体偏氧化的沉积环境.

沉积物中有机质氧指数 (OI) 的高低受沉积环境氧化还原强度的控制,通常氧化环境中氧指数较高,而还原环境中氧指数较低 (陈践发等, 2006). 随地层中氧指数 (OI) 的增大,莺歌海盆地中新统黄流组烃源岩样品 TOC 含量总体上表现出逐渐降低的趋势 (图 8),表明浅海相泥岩的有机质丰度明显受有机质保存条件的控制.

3.2.2 沉积演化 前人研究发现,莺歌海盆地中新世沉积中心的迁移,影响了不同地区烃源岩的发育 (徐新德等, 2015). 孢粉相研究发现,莺歌海盆地中新统样品点大多分布在沉积有机屑组分三元图的 P 端 (图 9),反映出盆地烃源岩样品发育在陆生植物源为主的边缘少氧-缺氧环境. 不同区块对比发现,东方区的样品数据点都在沿着 P-E 边线靠近 P

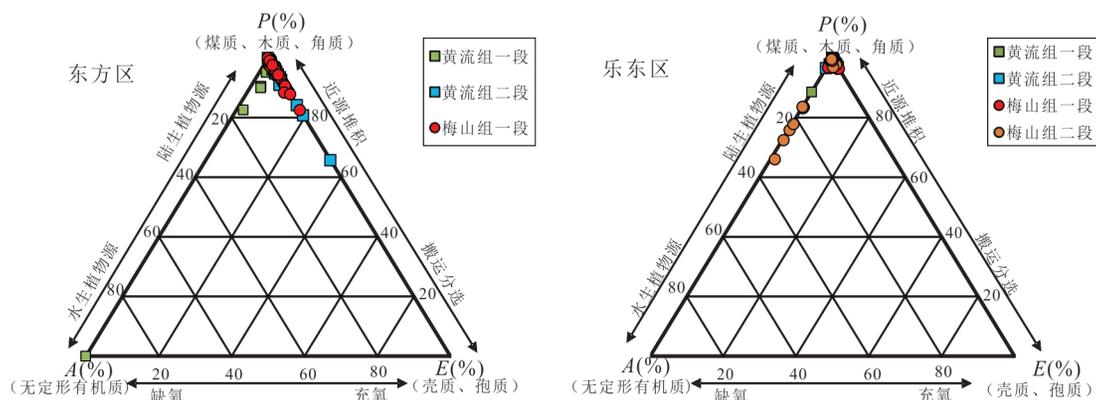


图9 莺歌海盆地东方区与乐东区有机屑组分 A-P-E 三元图

Fig.9 A-P-E ternary map of organic debris components in the Dongfang area and Ledong area of Yinggehai Basin

端区域,乐东区的样品数据点在 P-A 边线靠近 P 端区域,说明随着沉积、沉降中心向乐东区迁移,乐东区水生生物比例增加且水体含氧量降低,再次验证了沉积演化导致了平面上不同区块烃源岩的差异.根据盆地的沉积演化特征推测,梅山一三亚组沉积期,盆地的沉积沉降中心在东方区,红河和莺西物源在东方区大量堆积,使得东方区中新统烃源岩发育条件优于乐东区.

3.2.3 海平面变化 一些学者认为海相烃源岩在纵向上的发育受海平面升降变化的控制(高至前等, 2006).海平面变化主要是通过改变沉积环境的状态来控制烃源岩的发育的,相对海平面上升可引起水体分层,并在海水底部造成水体缺氧,有机质中类脂组分被优先保存和富集(Middelburg *et al.*, 1991; Mann *et al.*, 1997; 李天义等, 2008).熊小峰等(2016)研究发现莺一琼盆地海平面与干酪根同位素值随年代变化趋势较为一致,认为海平面变化对莺琼盆地烃源岩起到一定的控制作用.莺一琼盆地自早渐新世开始发生海侵,并在中中新世海侵达到最大(谢金有等, 2012),干酪根同位素也呈现出随海平面上升逐渐加重的趋势(图 10),至梅山组烃源岩的干酪根同位素最重.干酪根同位素可反映烃源岩母质类型,海生植物和陆生植物由于光合作用的差异,导致不同类型烃源岩有机质碳同位素值的差异(陶小晚等, 2014).因此,海平面的升降导致了纵向上烃源岩保存条件和生源构成的差异.

4 烃源岩发育模式及分布预测

通过对莺歌海盆地烃源岩发育影响因素的探讨,首次建立了中新世时期海相烃源岩发育模式

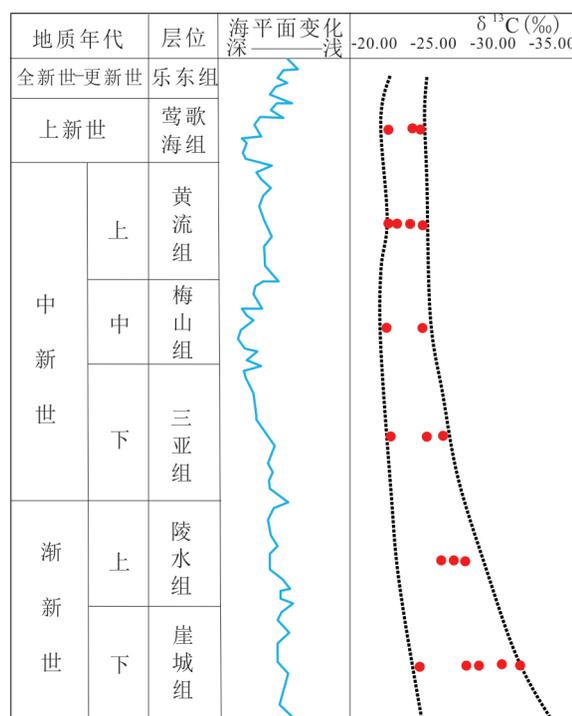


图10 莺一琼盆地海平面变化及干酪根碳同位素分布特征

Fig.10 Distribution characteristic map of the relative change of sea-level and carbon isotope of Kerogen in the Yinggehai-Qiongdongnan Basin

(图 11): 三亚—梅山组沉积时期,莺歌海盆地整体进入热沉降为主的时期,构造演化背景为坳陷阶段,对盆地形成有明显控制作用,盆地具有较大的可容纳空间;海南岛和红河物源的输入带来充足的陆源有机质,为水体生物生长提供了丰富的营养物质,热带、亚热带湿润气候适宜生物的生长.从发育的主控因素来看,古气候、古生产力是通过反映生物的繁衍,来影响烃源岩有机质的丰度;而古氧相、沉积演化、海平面变化都是通过改变沉积环境来控

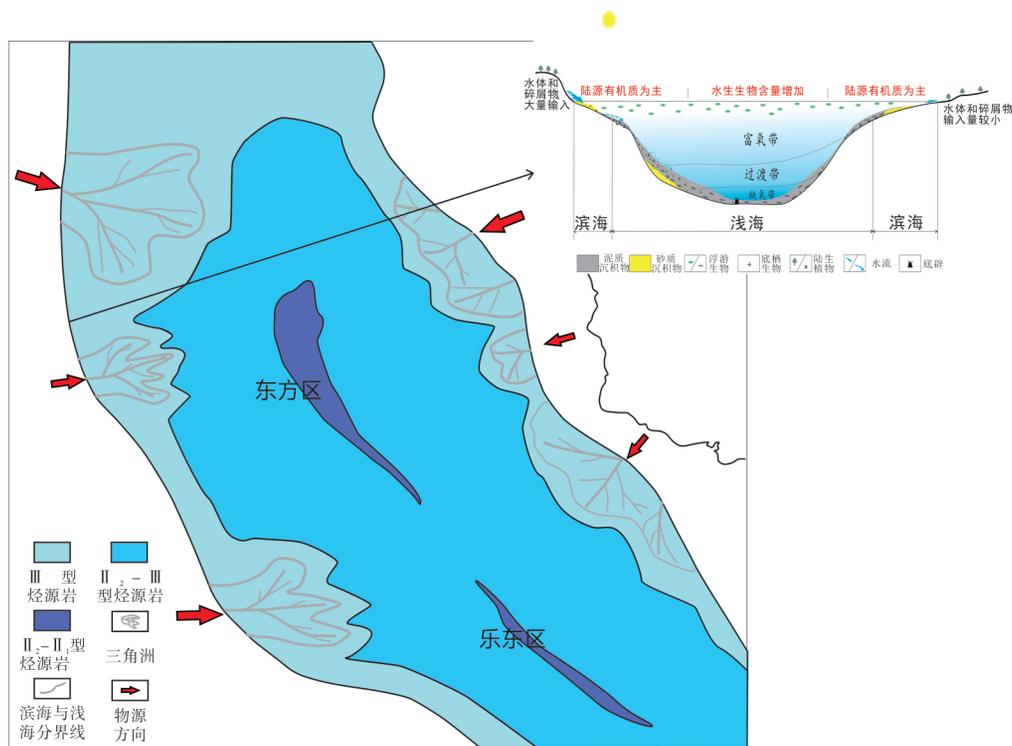


图 11 莺歌海盆地海相烃源岩发育模式

Fig.11 Model for the development of marine source rock in the Yinggehai Basin

制烃源岩的有机质类型和保存条件.因此,莺歌海盆地海相烃源岩发育的主控因素可以归纳为古生产力和保存条件两大因素,潜在源岩发育于近岸环境和外陆架区的低氧带.此外,沉积演化影响着平面上烃源岩的发育,海平面升降影响着纵向上烃源岩的发育.梅山—三亚沉积期,盆地的沉积、沉降中心位于东方区,红河物源在东方区大量堆积,使得东方区烃源岩更为发育.纵向上,自早渐新世开始发生海侵,并在中中新世海侵达到最大,整体而言梅山组的保存条件可能更好,也更有利于烃源岩的保存.

根据发育模式及主控因素可预测有利烃源岩发育区,中新世时期,莺歌海盆地边缘发育滨浅海相沉积,中央发育浅海相沉积,靠近物源的滨浅海位置水体主要以弱氧化—弱还原为主,但充足的陆源母质供给弥补了较差的保存条件,该区域为有利的烃源岩发育区.剖纵向上,无论是古生产力还是保存条件,梅山组都是中新统有利的烃源岩层段.

5 结论

(1)莺歌海盆地中新统发育浅海相烃源岩,已钻遇的梅山组、三亚组烃源岩有机质丰度总体较

低,有机质类型以 II_2 - III 型为主,具有陆源高等植物和低等水生生物混合输入特征,有机质热演化主要处于成熟阶段,凹陷中央热演化程度更高.

(2)中新统烃源岩发育模式:中新世时期,在温暖湿润的气候条件下,海南岛和红河物源充足,河水携带大量的陆源高等植物碎屑、矿物进入海域,保证了充足的母源供应.烃源岩形成于保存条件较差的偏氧化环境下(绝大多数样品的Pr/Ph比值为1~2,草莓状黄铁矿平均粒径普遍大于 $5.0\ \mu\text{m}$),但充足的陆源母质供给弥补了较差的保存条件,以古生产力和保存条件为主要控制因素.

(3)根据发育模式及主控因素预测,有利源岩发育于近岸环境和外陆架区的低氧带.平面上,东方区中新统烃源岩发育条件优于乐东区;纵向上,梅山组可能是有利的烃源层段.研究成果为正确认识莺歌海盆地烃源岩形成机制、空间分布特征并准确评价其资源潜力提供了重要依据.

References

- Bond, D.P.G., Wignall, P.B., 2010. Pyrite Framboid Study of Marine Permian-Triassic Boundary Sections: A Complex Anoxic Event and Its Relationship to Contempor-

- neous Mass Extinction. *Geological Society of America Bulletin*, 122(7/8): 1265—1279. doi:10.1130/b30042.1
- Chen, J.F., Zhang, S.C., Bao, Z.D., et al., 2006. Main Sedimentary Environments and Influencing Factors for Development of Marine Organic-Rich Source Rocks. *Marine Origin Petroleum Geology*, 11(3): 49—54 (in Chinese with English abstract).
- Cui, T., Xie, X.N., Ren, J.Y., et al., 2008. Dynamic Mechanism of Anomalous Post-Rift Subsidence in the Yinggehai Basin. *Earth Science*, 33(3): 351—356 (in Chinese with English abstract).
- Deng, M.F., Zhang, H.Y., Zhang, K.M., et al., 1990. Characteristics of Oil and Gas and Their Source Rocks Study in Qiongdongnan-Yinggehai Basins. *China Offshore Oil and Gas*, 4(1): 15—22 (in Chinese with English abstract).
- Engstrom, D.R., Wright, H.E.Jr., 1984. Chemical Stratigraphy of Lake Sediments as a Record of Environmental Change. In: Haworth, E.Y., Lund, J.W.G., eds., *Lake Sediments and Environmental History: Studies in Palaeolimnology and Palaeoecology in Honour of Winifred Tutin*. Leicester University Press, Bath, 11—67.
- Gong, Z.S., Li, S.T., 2004. Dynamic Research of Oil and Gas Accumulation in Northern Marginal Basins of South China Sea. Science Press, Beijing, 149—153 (in Chinese).
- Guo, X.X., Xiong, X.F., Xu, X.D., et al., 2017a. Type Classification and Origin Analysis of Natural Gas in the Yinggehai Basin. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 24(5): 54—58 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X.X., Xu, X.D., Xiong, X.F., et al., 2017b. Gas Accumulation Characteristics and Favorable Exploration Directions in Mid-Deep Strata of the Yinggehai Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28(12): 1864—1872 (in Chinese with English abstract).
- He, J.X., Chen, W.H., Li, M.X., 2000. Genetic Types of Natural Gas and Source Rocks in Ying-Qiong Basin. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 14(6): 398—405 (in Chinese with English abstract).
- Huang, B.J., Xiao, X.M., Dong, W.L., 2002. Characteristics of Hydrocarbon Source Rocks and Generation and Evolution Model of Natural Gas in Yinggehai Basin. *Natural Gas Industry*, 22(1): 26—30 (in Chinese with English abstract).
- Huang, B.J., Huang, H.T., Li, L., et al., 2010. Characteristics of Marine Source Rocks and Effect of High Temperature and Over-Pressure to Organic Matter Maturation in Yinggehai-Qiongdongnan Basins. *Marine Origin Petroleum Geology*, 15(3): 11—18 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z.X., Zeng, L., Li, M.X., et al., 1994. Tertiary in Petroliferous Regions of China (Ⅷ) The North Continental Shelf Region of South China Sea. Petroleum Industry Press, Beijing, 21—26 (in Chinese).
- Li, S.T., Xie, X.N., Jiao, Y.Q., 1997. Sequences and Models of Basin Filling-Up of the North South China Sea. Science Press, Beijing, 70—74 (in Chinese).
- Li, S.T., Lin, C.S., Zhang, Q.M., et al., 1998. Episodic Rifting and Its Dynamical Process in North Continental Margin of South China Sea, and the Tectonic Event from 10 Ma. *Chinese Science Bulletin*, 43(3): 797—810 (in Chinese with English abstract).
- Li, T.Y., He, S., Yang, Z., 2008. The Marine Source Rock Formation Conditions and Control Factors. *Geological Science and Technology Information*, 27(6): 63—70 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.Q., Xiong, B., Ma, A.L., et al., 2002. Advancement of Organic Petrology in Oil and Gas Exploration. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 24(1): 15—19 (in Chinese with English abstract).
- Liu, T.S., Wang, J.L., 1994. Basin Evolution and Natural Gas Distribution in Yinggehai Basin. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 8(6): 394—400 (in Chinese with English abstract).
- Mann, U., Stein, R., 1997. Organic Facies Variations, Source Rock Potential and Sea Level Changes in Cretaceous Black Shales of the Quebrada Ocal Upper Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, 81: 556—576.
- Middelburg, J. J., Calvert, S. E., Karlin, R., 1991. Organic-Rich Transitional Facies in Silled Basins: Response to Sea-Level Change. *Geology*, 19(7): 679. doi:10.1130/0091-7613(1991)019<0679:ortfis>2.3.co;2
- Peters, K. E., Walters, C. C., Moldowan, J. M., 2005. *The Biomarker Guide: Biomarkers and Isotopes in the Petroleum Exploration and Earth History*. 2ed. Cambridge University Press, Cambridge, 499—502.
- Schindler, D. E., Augerot, X., Fleishman, E., et al., 2008. Climate Change, Ecosystem Impacts, and Management for Pacific Salmon. *Fisheries*, 33(10): 502—506. doi:10.1577/1548-8446-33.10.502
- Tao, X.W., Li, M., Zhang, X.X., et al., 2014. Influence of Microbial Oxidation on $\delta^{13}\text{C}$ Values of Hydrocarbon Gases. *China Petroleum Exploration*, 19(3): 41—49 (in Chinese with English abstract).
- Tong, C.X., Xie, Y.H., Huang, Z.L., et al., 2015. Geochemical Behaviors of HPHT Gas Reservoirs in the Yinggehai Basin and the Efficient Gas Accumulation Mode at the Basin's Diapir Flanks. *Natural Gas Industry*, 35(2):

- 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Li, X.Q., Wang, G., et al., 2018. Geochemical Characteristics and Hydrocarbon Generation Potential of Miocene Marine Source Rocks in the Ying-Qiong Basin. *Geoscience*, 32(3):500—510(in Chinese with English abstract).
- Wu, H.Z., Huang, Z.L., Pei, J.X., et al., 2015. Causes of Natural Gas Geochemical Differences in the High-Temperature and Overpressure Zone of DF1-1 Diapir Belt, Yinggehai Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 37(2): 211—219(in Chinese with English abstract).
- Xie, J.Y., Zhu, Y.H., Li, X.X., et al., 2012. The Cenozoic Sea-Level Changes in Yinggehai-Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 17(1): 49—58(in Chinese with English abstract).
- Xie, Y.H., Li, X.S., Tong, C.X., et al., 2015. High Temperature and High Pressure Gas Enrichment Condition, Distribution Law and Accumulation Model in Central Diaper Zone of Yinggehai Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 27(4):1—12 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, X.F., Xu, X.D., Guo, X.X., et al., 2016a. Ethane Carbon Isotope Anomaly Genesis of Natural Gas in Yinggehai Basin. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 23(4): 85—89 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, X.F., Xu, X.D., Guo, X.X., et al., 2016b. Controlling Effects of Sedimentation on Organic Matter Maturation in Yinggehai Basin. *Natural Gas Geoscience*, 27(12): 2169—2175 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, X.F., Xu, X.D., Gan, J., et al., 2017. Differentiated Gas distribution, Migration and Accumulation in the Central Diaper Belt of the Yinggehai Basin. *Marine Geology Frontiers*, 33(7):24—31 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X.D., Zhang, Y.Z., Pei, J.X., et al., 2014. Gas Accumulating Models and Exploration Strategy for High Quality Natural Gas in the Dongfang Area, Yinggehai Basin. *Acta Geologica Sinica*, 88(5):956—965
- Xu, X.D., Zhang, Y.Z., Pei, J.X., et al., 2015. Control Effect of Tectonic Evolution on Gas Accumulation Difference in the Yinggehai Basin. *Natural Gas Industry*, 35(2):12—20(in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.L., Wei, J.L., Zeng, H., et al., 2017. Late Cretaceous Palynological Assemblage and its Palaeoclimate Record from Yaojia Formation in Qianjiadian Depression, Kailu Basin. *Earth Science*, 42(10): 1725—1735(in Chinese with English abstract).
- Yin, J., Wang, Q., Hao, F., et al., 2017. Palaeolake Environment and Depositional Model of Source Rocks of the Lower Submember of Sha1 in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 42(7): 1209—1221(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Z., Xu, X.D., Wang, L.F., et al., 2015. The Accumulation Process and Model of Overpressured Low Permeability Gas Pool in the North of South China Sea: A Case Study of XF13-1 Overpressured Gas Field in XF Area of the Yinggehai Basin. *Natural Gas Geoscience*, 26(9): 1679—1688 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈践发, 张水昌, 鲍志东, 等, 2006. 海相优质烃源岩发育的主要影响因素及沉积环境. *海相油气地质*, 11(3):49—54.
- 崔涛, 解习农, 任建业, 等, 2008. 莺歌海盆地异常裂后沉降的动力学机制. *地球科学*, 33(3):351—356.
- 邓鸣放, 张宏友, 梁可明, 等, 1990. 琼东南-莺歌海盆地油气特征及其烃源岩研究. *中国海上油气(地质)*, 4(1): 15—22.
- 高至前, 樊太亮, 李岩, 等, 2006. 塔里木盆地寒武系、奥陶系烃源岩发育模式及分布规律. *现代地质*, 20(1):69—76.
- 龚再升, 李思田, 2004. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究. 北京:科学出版社, 149—153.
- 郭潇潇, 熊小峰, 徐新德, 等, 2017a. 莺歌海盆地天然气类型划分与来源分析. *特种油气藏*, 24(5):54—58.
- 郭潇潇, 徐新德, 熊小峰, 等, 2017b. 莺歌海盆地中深层天然气成藏特征与有利勘探领域分析. *天然气地球科学*, 28(12):1864—1872.
- 何家雄, 陈伟煌, 李明兴, 2000. 莺-琼盆地天然气成因类型及气源剖析. *中国海上油气(地质)*, 14(6):398—405.
- 黄保家, 肖贤明, 董良伟, 2002. 莺歌海盆地烃源岩特征及天然气生烃演化模式. *天然气工业*, 22(1):26—30.
- 黄保家, 黄合庭, 李里, 等, 2010. 莺-琼盆地海相烃源岩特征及高温高压环境有机质热演化. *海相油气地质*, 15(3):11—18.
- 蒋仲雄, 曾麟, 李明兴, 等, 1994. 中国油气区第三系(Ⅷ)海北部大陆架油气区分册. 石油工业出版社, 21—26.
- 刘铁树, 王俊兰, 1994. 莺歌海盆地演化及天然气分布. *中国海上油气:地质*, 8(6): 394—400.
- 李思田, 解习农, 焦养泉, 1997. 南海北部边缘盆地充填序列和充填样式. 北京:科学出版社, 70—74.
- 李思田, 林畅松, 张启明, 等, 1998. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及 10 Ma 以来的构造事件. *科学通报*, 43(8):797—810.
- 李天义, 何生, 杨智, 2008. 海相优质烃源岩形成环境及其控制因素分析. *地质科技情报*, 27(6):63—70.
- 李贤庆, 熊波, 马安来, 等, 2002. 有机岩石学在油气勘探评价中的应用进展. *江汉石油学院学报*, 24(1):15—19.

- 陶小晚,李明,张欣欣,等,2014. 微生物氧化作用对有机烷烃气碳同位素的影响. 中国石油勘探,19(3):41-49.
- 童传新,谢玉洪,黄志龙,等,2015. 莺歌海盆地高温高压天然气地球化学特征及底辟翼部高效成藏模式. 天然气工业,35(2):1-11.
- 王元,李贤庆,王刚,等,2018. 莺歌海盆地中新统海相烃源岩地球化学特征及生烃潜力评价. 现代地质,32(3):500-510.
- 吴红烛,黄志龙,裴健翔,等,2015. 莺歌海盆地底辟带DF区天然气地球化学特征差异及其成因. 石油实验地质,37(2):211-219.
- 谢玉洪,李绪深,童传新,等,2015. 莺歌海盆地中央底辟带高温高压天然气富集条件、分布规律和成藏模式. 中国海上油气,27(4):1-12.
- 谢金有,祝幼华,李绪深,等,2012. 南海北部大陆架莺琼盆地新生代海平面变化. 海上油气地质:地质,17(1):49-58.
- 熊小峰,徐新德,甘军,等,2017. 莺歌海盆地中央底辟带天然气差异分布与运聚成藏特征. 海洋地质前沿,33(7):24-31.
- 熊小峰,徐新德,郭潇潇,等,2016a. 沉积过程对莺歌海盆地烃源岩生气的控制作用. 天然气地球科学,27(12):2169-2175.
- 熊小峰,徐新德,郭潇潇,等,2016b. 莺歌海盆地天然气乙烷碳同位素异常成因分析. 特种油气藏,23(4):85-89.
- 徐新德,张迎朝,裴建翔,等,2014. 莺歌海盆地东方区天然气成藏模式及优质天然气勘探策略. 地质学报,88(5):956-965.
- 徐新德,张迎朝,裴健翔,等,2015. 构造演化对莺歌海盆地天然气成藏差异性的控制作用. 天然气工业,35(2):12-20.
- 徐增连,魏佳林,曾辉,等,2017. 开鲁盆地东北部钱家店凹陷晚白垩世姚家组孢粉组合及其古气候意义. 地球科学,42(10):1725-1735.
- 殷杰,王权,郝芳,等,2017. 渤海湾盆地饶阳凹陷沙一下亚段古湖泊环境与烃源岩发育模式. 地球科学,42(7):1209-1221.
- 张迎朝,徐新德,王立锋,等,2015. 南海北部超压低渗气藏成藏过程与成藏模式——以莺歌海盆地XF区XF13-1超压气田为例. 天然气地球科学,26(9):1679-1688.