

莺歌海盆地中新统海相烃源岩形成环境及控制因素

裴健翔¹, 郭潇潇¹, 薛海涛², 吴杨瑜¹, 李珊珊¹, 李文浩²

[1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南 海口 570312; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580]

摘要:莺歌海盆地中钻遇中新统海相烃源岩的探井主要分布在盆地边缘及斜坡带, 中新统海相优质烃源岩的形成条件与分布规律尚不明确。从生物和环境地球化学的角度, 系统剖析了莺歌海盆地中新统海相烃源岩形成时期古海洋生产力、陆源有机质输入与氧化还原环境, 揭示了烃源岩发育的主控因素, 并预测了优质烃源岩分布。研究区中新统海相烃源岩中P/Ti值揭示古海洋生产力整体偏低, 其中乐东区有增大的趋势。由于莺歌海盆地周围发育多条河流, 陆源有机质供给充足, 其中被子植物来源的奥利烷在中新统海相烃源岩(尤其是三亚组烃源岩)中普遍存在; 莺北区、莺东斜坡、东方区和乐东区中新统海相烃源岩中Ni/Co值揭示烃源岩主要发育在偏氧化的沉积水体中, 乐东区沉积环境有变好的趋势。烃源岩总有机碳含量(TOC)与P/Ti和Ni/Co相关性揭示古生产力和氧化还原环境仅对乐东区L30-1井区烃源岩发育具有一定控制作用; TOC值与奥利烷指数(奥利烷/C₃₀藿烷)具有明显的正相关性, 表明陆源有机质输入对中新统海相烃源岩发育具有明显的控制作用。受海南岛和红河双物源影响的莺北区H29-1井区陆源有机质供给充足, 为中新统高有机质丰度海相陆源型烃源岩发育的有利场所; D29-2井区和L30-1井区附近古海洋生产力和保存条件较好, 可发育内源型优质烃源岩。

关键词:氧化还原环境; 古海洋生产力; 陆源有机质输入; 中新统海相烃源岩; 莺歌海盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Environment and controlling factors of the Miocene marine source rocks in the Yinggehai Basin

PEI Jianxiang¹, GUO Xiaoxiao¹, XUE Haitao², WU Yangyu¹, LI Shanshan¹, LI Wenhao²

[1. Hainan Branch, CNOOC, Haikou, Hainan 570312, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: Wells encountering the Miocene marine source rocks in the Yinggehai Basin are mostly confined to the edge and slope areas, leaving the overall forming environment and distribution of these high-quality source rocks in the basin a puzzle to be cracked. This paper, from the perspective of biogeochemistry and environmental geochemistry, reveals the main controlling factors of the formation and distribution of the source rocks through a systematical analysis of paleo-productivity, terrestrial organic matter input and redox conditions of the rocks in the basin. The P/Ti values of the source rocks indicate relatively low paleo-productivity, with only that of the Ledong area showing an increasing trend. The supply of terrestrial organic matter is relatively sufficient because of several rivers around the basin. Oleanane derived from angiosperms is widely occurring in the source rocks, especially those in the Sanya Formation. The Ni/Co ratios of the rocks from the Yingbei, Yingdong Slope, Dongfang and Ledong areas indicate an oxic environment with the redox conditions in the Ledong area better than the rest. The relationship between TOC values and P/Ti and Ni/Co ratios shows that the paleo-productivity and redox conditions only control the formation of the source rocks from L30-1 wellblock in the Ledong area. TOC values of the source rocks have a positive correlation with the oleanane index (oleanane/C₃₀ hopane), showing that terrestrial organic matter input has a significant control effect on the development of marine source rocks. The H29-1 wellblock of the Yingbei area, provided with sufficient supply of terrestrial organic matter from both Hainan Island and the Red River, serves as a perfect location for enrichment of high organic marine source rocks.

收稿日期: 2023-01-27; 修回日期: 2023-05-31。

第一作者简介: 裴健翔, (1970—), 男, 教授级高级工程师, 南海油气勘探。E-mail: peijx001@163.com。

通信作者简介: 李文浩 (1985—), 男, 副教授, 硕士生导师, 古海洋学、有机地球化学与非常规油气地质。E-mail: liwh@upc.edu.cn。

基金项目: 海南省院士创新平台科研项目, 中海油科技项目 (KJZH-2021-0003-00)。

While the D29-2 and L30-1 wellblocks with fine paleo-productivity and redox conditions are relatively good for the formation of endogenous high-quality source rocks.

Key words: redox condition, paleo-productivity, terrestrial organic matter input, Miocene marine source rock, Yinggehai Basin

引用格式:裴健翔,郭潇潇,薛海涛,等.莺歌海盆地中新统海相烃源岩形成环境及控制因素[J].石油与天然气地质,2023,44(4):937-945. DOI: 10.11743/ogg20230411.

PEI Jianxiang, GUO Xiaoxiao, XUE Haitao, et al. Environment and controlling factors of the Miocene marine source rocks in the Yinggehai Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 937-945. DOI: 10.11743/ogg20230411.

关于高有机质丰度海相烃源岩形成的主要控制因素,早在20世纪80年代就存在“保存条件”和“生产力”两方面的争论^[1-3]。目前,越来越多的人认为海相烃源岩的形成是有机质供给、有机质保存及沉积速率等因素共同叠加的结果,其中最主要的影响因素为古生产力和氧化还原环境^[4-5]。然而,陆源有机质输入是影响大陆边缘盆地烃源岩发育的重要因素^[6-7],烃源岩较发育的大西洋裂谷系盆地均位于大河口下方,大型河流或三角洲提供了丰富的陆源有机质,为烃源岩的形成奠定了良好的物质基础^[8-12]。

尽管中新统海相烃源岩被认为是莺歌海盆地主力烃源岩,对研究区天然气具有重要贡献^[13-15],但目前针对中新统海相烃源岩的研究相对较少,主要原因在于探井多集中在盆地边缘或斜坡带,中央凹陷带钻遇中新统海相烃源岩的探井相对较少,其中东方区尚未钻遇三亚组,严重影响了莺歌海盆地中新统海相烃源岩系统研究与评价。业已认识到,中新统海相烃源岩有机质丰度整体偏低,其中梅山组烃源岩有机质丰度整体好于三亚组,有机质类型以Ⅱ₂型和Ⅲ型为主,烃源岩以低熟和成熟阶段为主,烃源岩形成时期古海洋生产力偏低,陆源有机质输入量相对较大,烃源岩主要发育在偏氧化的沉积环境,烃源岩以海相陆源型为主,东方区和乐东区可能发育有机质保存条件相对较好的内源型(藻类生源为主)烃源岩^[16-18]。

尽管目前已初步明确了莺歌海盆地中新统海相烃源岩形成环境及生烃潜力,但是由于烃源岩纵、横向上均具有明显的非均质性,中新统海相烃源岩形成环境及控制因素仍不明确,严重制约了对中新统海相烃源岩生烃潜力的认识,导致目前中新统海相优质烃源岩形成条件与分布规律的认识尚不明晰。有鉴于此,本文系统剖析了莺歌海盆地中新统海相烃源岩形成时期古海洋生产力、陆源有机质输入量与氧化还原环境,揭示了烃源岩发育主要控制因素,为研究区优质烃源岩分布预测提供了理论依据。

1 区域地质概况

莺歌海盆地位于中国海南岛西侧、越南以东,北西—南东向近似为菱形展布,为高温高压、快速埋藏、厚度大的新生代大陆边缘盆地,构造位置处于哀牢—红河断裂带,为走滑—伸展盆地,经历了断陷和拗陷两阶段的构造演化,盆地可进一步划分为临高凸起、中央凹陷、莺东斜坡带和莺西斜坡带等次级构造^[19-21]。盆地地层自下而上为始新统、渐新统崖城组和陵水组、中新统三亚组、梅山组和黄流组、上新统莺歌海组和更新统乐东组(图1)。前人研究表明,盆地发育有3套烃源岩:始新统湖相泥岩、渐新统崖城组和陵水组海—陆过渡相泥岩、中新统三亚组和梅山组海相泥岩^[16-17]。其中盆地凹陷期半封闭浅海环境下沉积的三亚组和梅山组烃源岩为主力烃源岩^[18, 22],同时与黄流组和莺歌海组中发育的砂岩及泥岩构成了良好的生—储—盖组合^[13, 20]。

2 烃源岩形成环境及控制因素

2.1 古海洋生产力

海洋中的氮和磷的比值总体趋于稳定,大约为(15~16):1,前者消耗完可以从大气中获取,而磷元素则不能,因此磷元素为海洋生产力最终体现者^[23],为了消除陆源输入对生产力的影响,通常采用P/Ti值研究海洋生产力。此外,Murray等人认为Al/Ti值也可以用于研究海洋生产力,但该比值受陆源碎屑输入影响较大^[24-25]。鉴于Al/Ti值受陆源碎屑输入影响较大,本文主要根据P/Ti值判识古生产力大小。莺歌海盆地莺北区、莺东斜坡、东方区和乐东区中新统海相烃源岩的P/Ti值分别分布在0.10~0.15、0.10~0.24、0.13~0.14和0.09~0.37(图2a—d),平均值分别为0.13、0.14、0.13和0.16,与澳大利亚后太古宙页岩(PAAS)

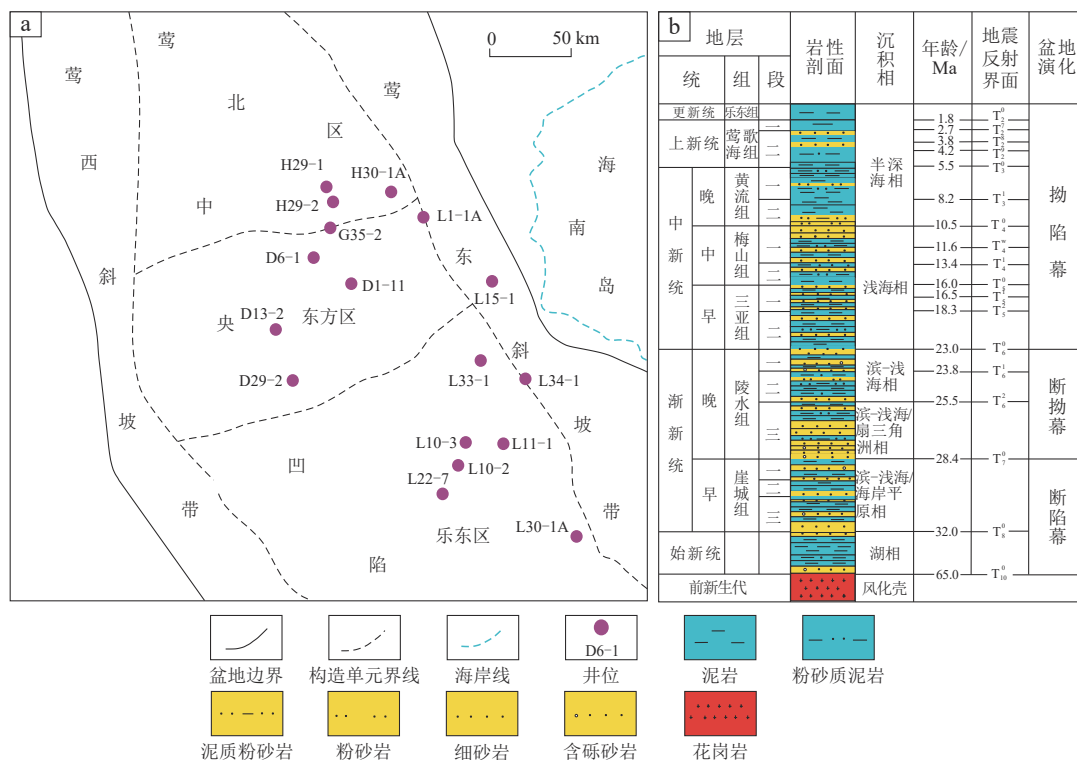
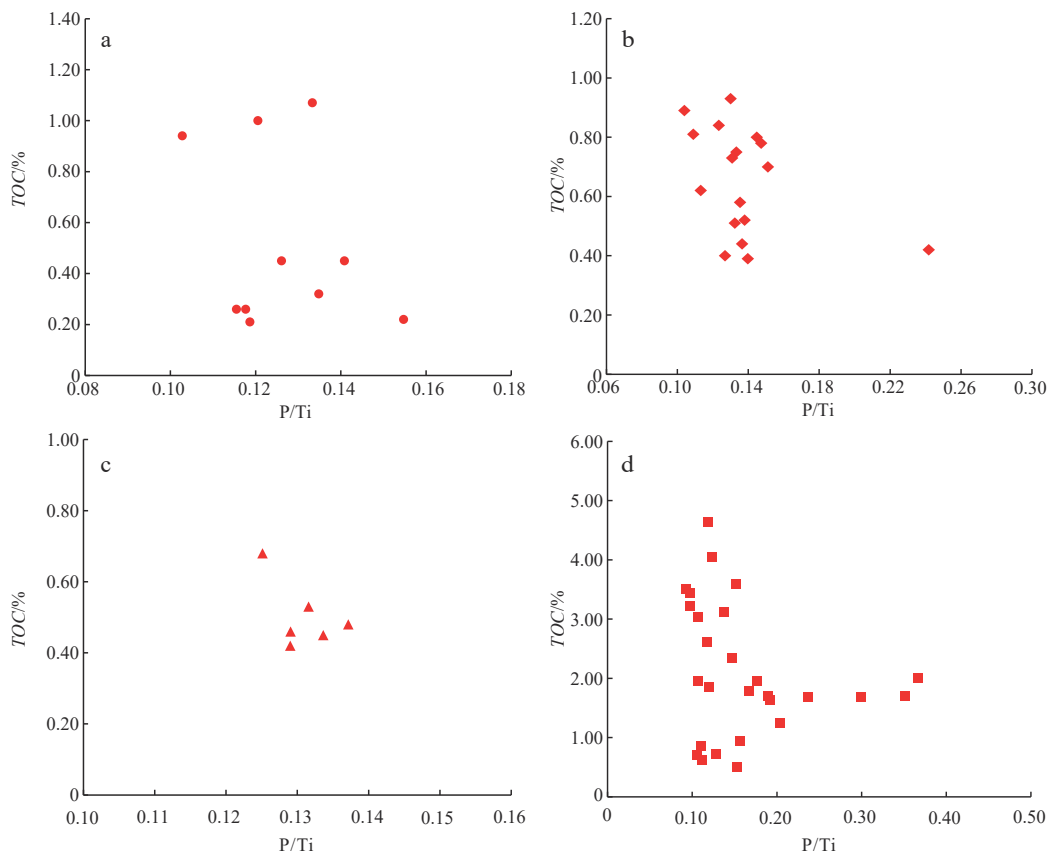
图1 莺歌海盆地构造区划分(a)及地层柱状图(b)^[18]Fig. 1 Structural units (a) and stratigraphic column (b) of the Yinggehai Basin^[18]

图2 莺歌海盆地中新统海相烃源岩 TOC 与 P/Ti 含量比值关系

Fig. 2 The relationship between the TOC values and the P/Ti ratios of the Miocene marine source rocks in the Yinggehai Basin

a. 莺歌海盆地北带; b. 莺歌海盆地北坡; c. 莺歌海盆地东区; d. 莺歌海盆地东区

的 P/Ti 值 0.12^[26] 较为接近,但远远小于赤道太平洋高生产力地区的 P/Ti 值 2~8^[27]。总体来看,烃源岩发育时期海洋生产力相对偏低,乐东区古海洋生产力有增加的趋势,烃源岩的总有机碳含量(TOC)与 P/Ti 值没有明显的相关性,表明古海洋生产力并非烃源岩发育的控制因素。然而,乐东区 L30-1 探井揭示中新统海相烃源岩的 P/Ti 值明显增大,平均值可达 0.27,且与 TOC 值具有明显的正相关性(图 3),表明乐东区 L30-1 井区附近古海洋生产力相对较高,且其对烃源岩的发育具有一定的控制作用。

2.2 陆源有机质输入量

莺歌海盆地周围发育多条河流,不同物源其陆源有机质输入存在一定差异,进而影响烃源岩发育。如越南红河三角洲输送来了更多的被子植物^[28],受双物源影响的 H29-1 井(红河影响较大,海南岛物源影响相对较小)孢粉化石资料揭示陆源有机质主要以被子植物为主,次为蕨类植物,裸子植物含量相对较低(图 4a);而受海南岛物源影响的 L1-1 井揭示,陆源有机质以蕨类植物为主,次为被子植物(图 4b)。研究区中新统海相烃源岩中均检测到不同含量的奥利烷(图 5),奥利烷为被子植物生源,是常用于指示源岩有机质输入和地质年代的生物标志化合物^[29]。三亚组烃源岩奥利烷含量明显高于梅山组烃源岩(图 5),表明三亚组沉积时期陆源有机质输入量相对较大。此外,正构烷烃的分布特征也能反映上述规律,三亚组烃源岩正构烷烃

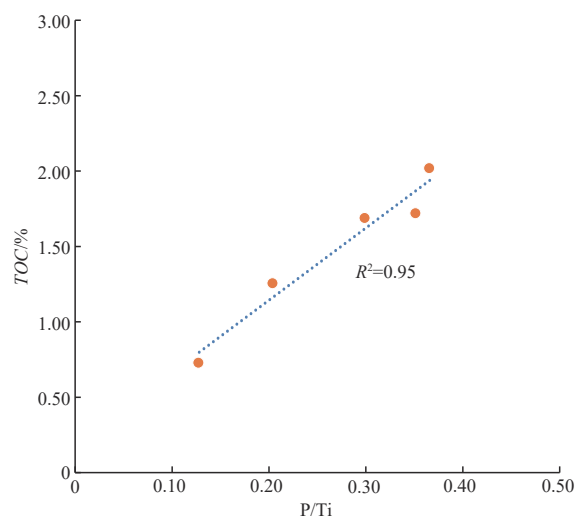


图3 莺歌海盆地乐东区 L30-1 井揭示中新统海相烃源岩 TOC 与 P/Ti 含量比值关系

Fig. 3 The relationship between the TOC values and the P/Ti ratios of the Miocene marine source rocks from the Well L30-1 in the Ledong area of the Yinggehai Basin

分布偏后峰型,而梅山组烃源岩正构烷烃以前峰型分布特征为主(图 5)。研究区沉积相特征揭示三亚组沉积时期,受到多物源供给影响,陆源有机质输入量充足;而梅山组沉积时期,海南岛物源明显减少,但梅山组海底扇相对较发育,总体来看陆源有机质输入也相对较充足。中新统海相烃源岩 TOC 值与奥利烷指数(奥利烷/ C_{30} 藿烷)之间具有明显的正相关性(图 6),表明陆源有机质输入量(尤其是被子植物含量)对中新

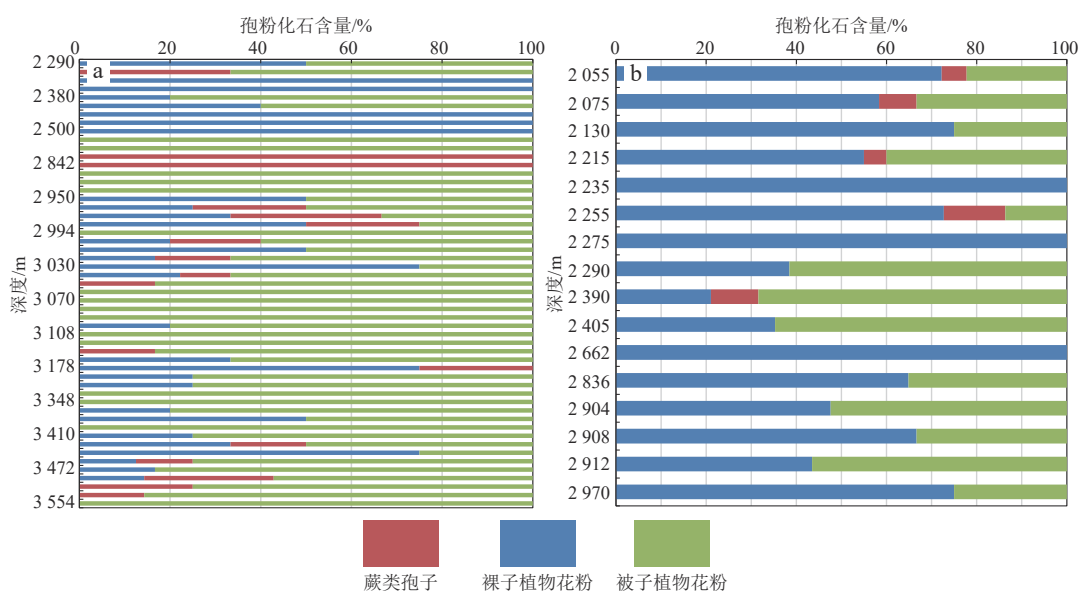


图4 莺歌海盆地中新统烃源岩中孢粉化石百分含量

Fig. 4 The percentage of pollen of the Miocene source rocks in the Yinggehai Basin

a. H29-1 井; b. L1-1 井

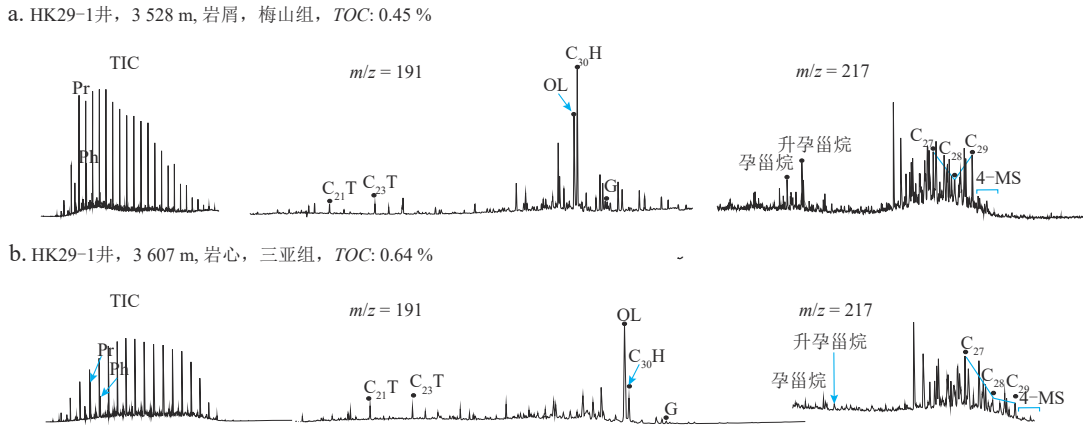


图5 莺歌海盆地中新统海相烃源岩质量色谱图

Fig. 5 Mass chromatogram of the Miocene source rocks in the Yinggehai Basin

Pr. 姥鲛烷; Ph. 植烷; $C_{21}T$. C_{21} 三环萜烷; $C_{23}T$. C_{23} 三环萜烷; OL. 奥利烷; $C_{30}H$. C_{30} 藿烷; G. 伽马蜡烷; C_{27} . C_{27} 规则甾烷; C_{28} . C_{28} 规则甾烷; C_{29} . C_{29} 规则甾烷; 4-MS. C_{30} -4甲基甾烷

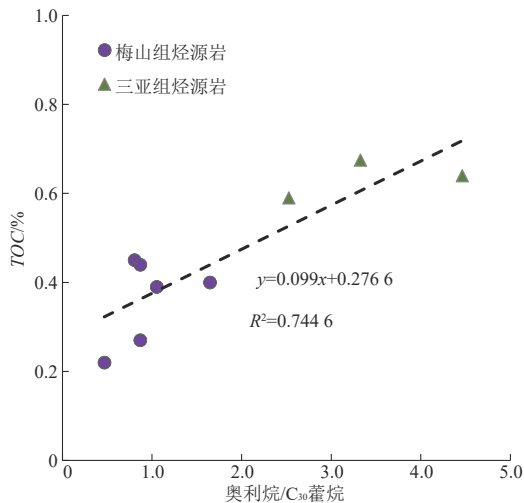


图6 莺歌海盆地中新统海相烃源岩TOC与奥利烷指数关系

Fig. 6 The relationship between the TOC values and oleanane index of the Miocene marine source rocks in the Yinggehai Basin

统海相烃源岩发育具有明显的控制作用。莺北区受红河物源影响最大,尤其是H29-1井,被子植物来源的奥利烷含量较高,其中新统烃源岩TOC值也明显高于其他地区(图7);尽管乐东地区被子植物含量相对较低,但由于其古生产力高于其他地区(尤其是LD30-1井区附近),该区亦可发育高有机质丰度烃源岩(图7)。

2.3 氧化还原环境

U/Th值和Ni/Co值通常用于判识烃源岩形成时期水体的氧化还原条件,通常认为U/Th值大于1.25为厌氧环境,介于0.75~1.25为贫氧环境,小于0.75为富氧环境;Ni/Co值大于7.00为厌氧环境,介于5.00~

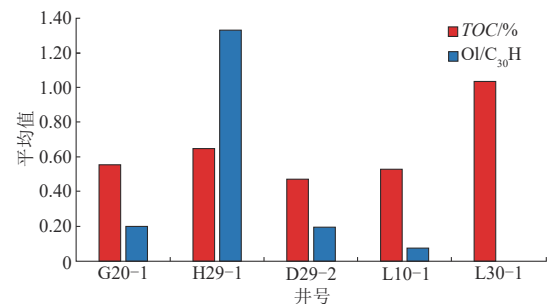


图7 莺歌海盆地不同地区中新统海相烃源岩TOC与奥利烷指数分布特征

Fig. 7 Distribution of the TOC values and oleanane index of the Miocene marine source rocks in different areas of the Yinggehai Basin
OI/ $C_{30}H$. 奥利烷/ C_{30} 藿烷

7.00为贫氧环境,小于5.00为富氧环境^[30]。本文采用Ni/Co值来探讨莺歌海盆地中新统海相烃源岩发育时期水体的氧化还原环境。莺歌海盆地莺北区、莺东斜坡、东方区和乐东区中新统海相烃源岩的Ni/Co值分别分布在2.50~3.22、2.07~3.63、2.56~5.02和2.18~9.17(图8a—d),平均值分别为2.89、2.95、3.21和3.80,中新统烃源岩发育时期,莺歌海盆地各构造带沉积水体均以氧化环境为主。总体上来看,烃源岩的TOC值与Ni/Co值没有明显的相关性(图8a—d),表明氧化还原条件并非烃源岩发育的主要控制因素。值得注意的是,乐东区L30-1探井揭示中新统海相烃源岩中Ni/Co值明显增大,主要分布在2.37~5.71(图9),平均值为4.14,表明L30-1附近有机质保存条件有变好的趋势,且Ni/Co值与TOC之间具有明显的正相关性(图9),表明乐东区L30-1井区附近水

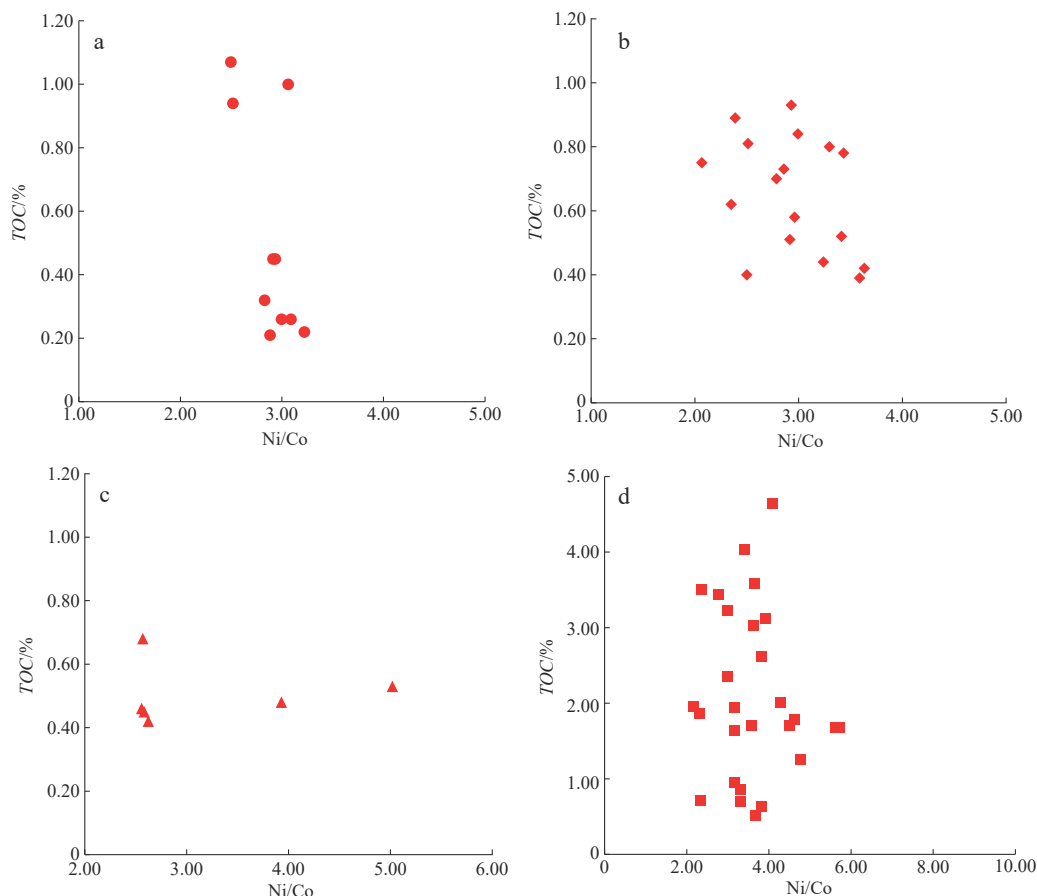


图8 莺歌海盆地中新统海相烃源岩 TOC 与 Ni/Co 含量比值关系

Fig. 8 The relationship between the TOC values and the Ni/Co ratios of the Miocene marine source rocks in the Yinggehai Basin

a. 莺北区; b. 莺东斜坡; c. 东方区; d. 乐东区

体的氧化还原条件对烃源岩的发育具有一定的控制作用。

3 优质烃源岩发育模式

莺北区至东方区, 三亚组沉积时期, H29-1 井区附近发育三角洲, 受红河和海南岛北部双物源影响, 被子植物极为发育, 陆源有机质供给充足, 水体为氧化环境, 不利于藻类有机质保存, 但对陆源有机质影响较小, 可发育高有机质丰度海相陆源型烃源岩 (图 10a); 从莺北区 G35-2 井区至东方区 D13-2 井区, 水体逐渐变深, 但仍以氧化环境为主, 由于古生产力偏低, 有机质仍以陆源输入为主, 但其输入量逐渐减少 (图 7), 不利于高有机质丰度烃源岩的形成 (图 10a); D29-2 井区靠近沉积中心, 保存条件较好, 可发育内源型 (藻类生源为主) 优质烃源岩 (图 10a)。梅山组沉积时期, 整体陆源有机质输入量有降低的趋势, H29-1 井区附近发育海底扇, 陆源有机质供给仍较为充足, 水体为氧化环境, 可发育高有机质丰度海相陆源型烃源岩 (图 10b);

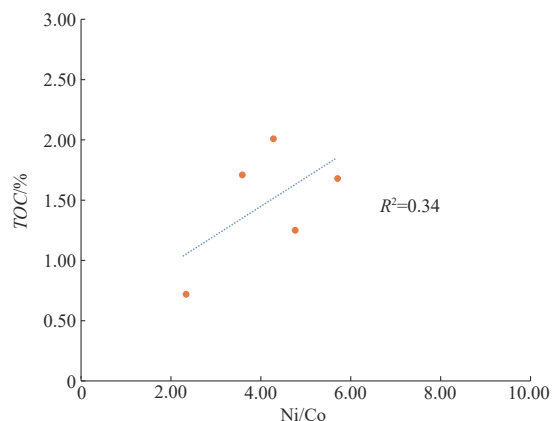


图9 莺歌海盆地乐东区 L30-1 井揭示的中新统海相烃源岩 TOC 与 Ni/Co 含量比值关系

Fig. 9 The relationship between the TOC values and the Ni/Co ratios of the Miocene marine source rocks from the Well L30-1 in the Ledong area of the Yinggehai Basin

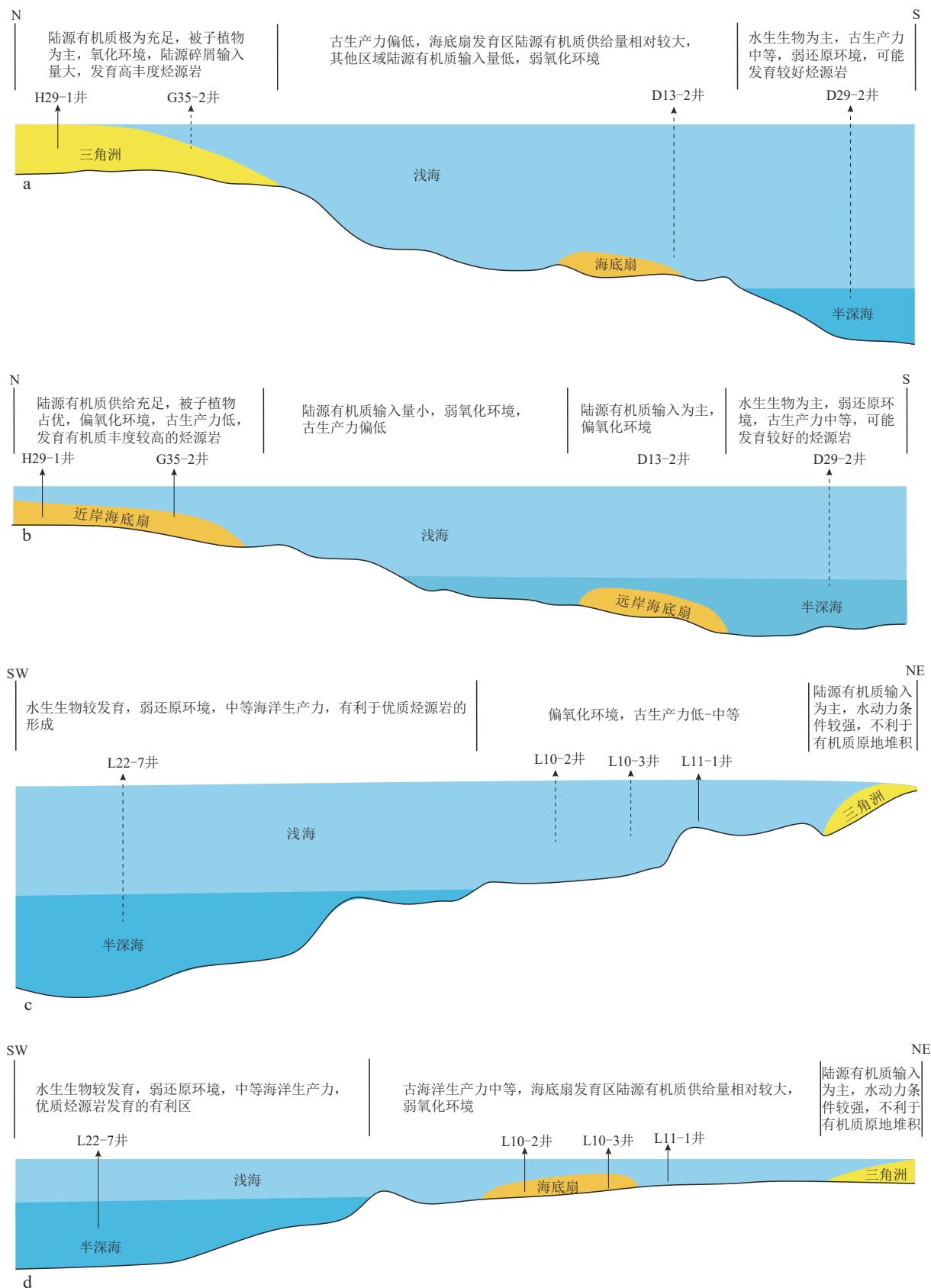


图10 莺歌海盆地中新统海相烃源岩发育模式

Fig. 10 The development model of the Miocene marine source rocks in the Yinggehai Basin

a. 三亚组剖面1; b. 梅山组剖面1; c. 三亚组剖面2; d. 梅山组剖面2

从G35-2井区至D13-2井区,发育浅海相沉积,为弱氧化环境,有机质主要为陆源高等植物,不利于高有机质丰度烃源岩的形成(图10b);D29-2井区附近水深加大,古海洋生产力和保存条件均较好,可发育内源型优质烃源岩(图10b)。此外,L30-1井资料揭示乐东区存在古生产力和有机质保存条件较好的区域(前文已有详述),为优质烃源岩发育有利场所。三亚组和梅山组沉积时期,从L11-1至L22-7方向,古生产力和氧化还原条件均有变好的趋势,可发育内源型优质烃源岩(图10c,d)。

4 结论

1) 莺歌海盆地中新统海相烃源岩形成时期,古海洋生产力相对偏低、沉积水体以氧化环境为主,乐东区古海洋生产力和氧化还原环境均有变好的趋势;古海洋生产力和氧化环境对莺歌海盆地中新统海相烃源岩无明显控制作用,仅对L30-1井区附近烃源岩具有一定控制作用;陆源有机质输入为烃源岩发育的主要控制因素。

2) 受到海南岛和红河双物源的影响,莺北区H29-1井区陆源有机质供给充足,为三亚组和梅山组高有机质丰度海相陆源型烃源岩发育的有利场所;D29-2井区L30-1井区附近古海洋生产力和保存条件均较好,可发育内源型优质烃源岩。

参 考 文 献

- [1] TYSON R V. The genesis and palynofacies characteristics of marine petroleum source rocks [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1987, 26(1): 47-67.
- [2] TYSON R V, PEARSON T H. Modern and ancient continental shelf anoxia: An overview [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1991, 58(1): 1-24.
- [3] CALVERT S E, PEDERSEN T F. Organic carbon accumulation and preservation [M]//WHELAN J K, FARRINGTON J W. Organic Matter: Productivity, Accumulation, and Preservation in Recent and Ancient Sediments. New York: Columbia University Press, 1992: 231.
- [4] STOW D A V, HUC A Y, BERTRAND P. Depositional processes of black shales in deep water [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(4): 491-498.
- [5] 陈践发, 张水昌, 孙省利, 等. 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要影响因素 [J]. 地质学报, 2006, 80(3): 467-472.
CHEN Jianfa, ZHANG Shuichang, SUN Shengli, et al. Main factors influencing marine carbonate source rock formation [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3): 467-472.
- [6] LI Wenhao, ZHANG Zhihuan, LI Youchuan, et al. The main controlling factors and developmental models of Oligocene source rocks in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. Petroleum Science, 2013, 10(2): 161-170.
- [7] LI Wenhao, ZHANG Zhihuan, LI Youchuan, et al. The effect of river-delta system on the formation of the source rocks in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 76: 279-289.
- [8] STEPHENSON A E, CADMAN S J. Browse basin, northwest Australia: The evolution, palaeogeography and petroleum potential of a passive continental margin [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1994, 111(3/4): 337-366.
- [9] PETERS K E, SNEDDEN J W, SULAEMAN A, et al. A new geochemical-sequence stratigraphic model for the Mahakam Delta and Makassar Slope, Kalimantan, Indonesia [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(1): 12-44.
- [10] LONGLEY I M, BUESSENSCHUETT C, CLYDSDALE L, et al. The north west shelf of Australia—a woodside perspective [C]//Proceedings of the Sedimentary Basins of Western Australia 3. Perth: Petroleum Exploration Society of Australia, 2002: 27-88.
- [11] SAMUEL O J, CORNFORD C, JONES M, et al. Improved understanding of the petroleum systems of the Niger Delta Basin, Nigeria [J]. Organic Geochemistry, 2009, 40(4): 461-483.
- [12] AKINLUA A, TORTO N. Geochemical evaluation of Niger Delta sedimentary organic rocks: A new insight [J]. International Journal of Earth Sciences, 2011, 100(6): 1401-1411.
- [13] 李华, 杨朝强, 周伟, 等. 莺歌海盆地东方1-1气田中新统黄流组浅海多级海底扇形成机理及储层分布 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 429-440.
LI Hua, YANG Zhaoqiang, ZHOU Wei, et al. Genetic mechanism and reservoir distribution of shallow-marine multi-stepped submarine fans in the Miocene Huangliu Formation of Dongfang 1-1 gas field, Yinggehai Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 429-440.
- [14] 范彩伟, 刘爱群, 吴云鹏, 等. 莺歌海盆地乐东10区新近系黄流组储层天然气充注与超压演化史 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1370-1381.
FAN Caiwei, LIU Aiqun, WU Yunpeng, et al. Gas charging and overpressure evolution history of the Neogene Huangliu Formation reservoir in Ledong 10 area, Yinggehai Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1370-1381.
- [15] 刘海钰, 范彩伟, 庾雷, 等. 莺歌海凹陷东斜坡中北段天然气成因及成藏特征 [J]. 中国海上油气, 2022, 34(2): 25-34.
LIU Haiyu, FAN Caiwei, TUO Lei, et al. Origin and accumulation characteristics of natural gas in the middle and north section of eastern slope, Yinggehai Sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(2): 25-34.
- [16] 王立锋, 宋瑞有, 陈殿远, 等. 莺歌海盆地D13区新近系黄流组大型海底扇地震识别及含气性预测 [J]. 岩性油气藏, 2022, 34(4): 42-52.
WANG Lifeng, SONG Ruiyou, CHEN Dianyuan, et al. Seismic

- identification and gas-bearing prediction of large-scale submarine fans of Neogene Huangliu Formation in D13 area of Yinggehai Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(4): 42–52.
- [17] 徐新德, 杨计海, 刘海钰, 等. 莺歌海盆地浅海环境下烃源岩有机质形成机制[J]. *地球科学*, 2019, 44(8): 2643–2653.
- XU Xinde, YANG Jihai, LIU Haiyu, et al. Formation mechanism of organic matter in source rocks under marine environment in Yinggehai Basin[J]. *Earth Science*, 2019, 44(8): 2643–2653.
- [18] 徐建永, 赵牛斌, 徐仕琨, 等. 莺歌海盆地中新统海相烃源岩发育主控因素及模式[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(2): 54–63.
- XU Jianyong, ZHAO Niubin, XU Shikun, et al. Main controlling factors and development model of the Miocene marine source rocks in Yinggehai Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(2): 54–63.
- [19] 王振峰, 何家雄, 解习农. 莺歌海盆地泥-流体底辟带热流体活动对天然气运聚成藏的控制作用[J]. *地球科学*, 2004, 29(2): 203–210.
- WANG Zhenfeng, HE Jiaxiong, XIE Xinong. Heat flow action and its control on natural gas migration and accumulation in mud-fluid diapir areas in Yinggehai Basin[J]. *Earth Science*, 2004, 29(2): 203–210.
- [20] 谢玉洪, 李绪深, 童传新, 等. 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[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(4): 1–12.
- XIE Yuhong, LI Xushen, TONG Chuanxin, et al. High temperature and high pressure gas enrichment condition, distribution law and accumulation model in central diapir zone of Yinggehai Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(4): 1–12.
- [21] 范彩伟. 莺歌海大型走滑盆地构造变形特征及其地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(2): 190–199.
- FAN Caiwei. Tectonic deformation features and petroleum geological significance in Yinggehai large strike-slip basin, South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 190–199.
- [22] 黄保家, 黄合庭, 李里, 等. 莺-琼盆地海相烃源岩特征及高温高压环境有机质热演化[J]. *海相油气地质*, 2010, 15(3): 11–18.
- HUANG Baojia, HUANG Heting, LI Li, et al. Characteristics of marine source rocks and effect of high temperature and overpressure to organic matter maturation in Yinggehai–Qiongdongnan basins [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2010, 15(3): 11–18.
- [23] TYRRELL T. The relative influences of nitrogen and phosphorus on oceanic primary production [J]. *Nature*, 1999, 400 (6744): 525–531.
- [24] 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.
- [25] MURRAY R W, KNOWLTON C, LEINEN M, et al. Export production and carbonate dissolution in the central equatorial Pacific Ocean over the past 1 Myr [J]. *Paleoceanography*, 2000, 15(6): 570–592.
- [26] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific, 1985: 312.
- [27] MURRAY R W, LEINEN M. Chemical transport to the seafloor of the equatorial Pacific Ocean across a latitudinal transect at 135° W: Tracking sedimentary major, trace, and rare earth element fluxes at the Equator and the Intertropical Convergence Zone [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(17): 4141–4163.
- [28] 李中乔, 吴莹, 李珍, 等. 越南红河水下三角洲表层沉积物中有机物分布及来源分析[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(3): 577–583.
- LI Zhongqiao, WU Ying, LI Zhen, et al. Distribution and source of organic matter in the surface sediments from the Red River subaquatic delta, Vietnam [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, 44(3): 577–583.
- [29] MOLDOWAN J M, DAHL J, HUIZINGA B J, et al. The molecular fossil record of oleanane and its relation to angiosperms [J]. *Science*, 1994, 265(5173): 768–771.
- [30] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 无机地球化学参数与有效烃源岩发育环境的相关研究[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(2): 193–200.
- TENG Geer, LIU Wenhui, XU Yongchang, et al. Correlative study on parameters of inorganic geochemistry and hydrocarbon source rocks formative environment [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(2): 193–200.

(编辑 张亚雄)