



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

元素地球化学在新区古环境重建中的应用

何雁兵, 雷永昌, 邱欣卫, 肖张波, 贾连凯

Application of element geochemistry in paleoenvironment reconstruction in new area: A case study of Hanjiang 15 Subsag in Pearl River Mouth Basin

HE Yanbing, LEI Yongchang, QIU Xinwei, XIAO Zhangbo, and JIA Liankai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022010901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77

生物载体对海底冷泉-热液极端环境的地球化学记录

Geochemical records of biological carriers on deepsea hydrothermal vent and methane seep fields

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 42

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

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

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 Yangtian Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究

A review of studies on the magmatism at Southwest Indian Ridge from petrological and geochemical perspectives

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 126



关注微信公众号，获得更多资讯信息

何雁兵, 雷永昌, 邱欣卫, 等. 元素地球化学在新区古环境重建中的应用——以珠江口盆地韩江 15 洼为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(4): 159-170.

HE Yanbing, LEI Yongchang, QIU Xinwei, et al. Application of element geochemistry in paleoenvironment reconstruction in new area: A case study of Hanjiang 15 Subsag in Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(4): 159-170.

元素地球化学在新区古环境重建中的应用 ——以珠江口盆地韩江 15 洼为例

何雁兵, 雷永昌, 邱欣卫, 肖张波, 贾连凯

中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054

摘要: 应用元素地球化学方法对珠江口盆地珠一坳陷东北部韩江凹陷新钻井 H4 开展了系统分析研究, 在其元素地球化学分析结果的基础上, 重点对韩江 15 洼沉积古环境进行了详细分析, 初步探讨和阐明了韩江 15 洼始新世沉积环境及其纵向演化过程, 并获得了以下重要成果与认识: ①重建了韩江 15 洼始新统古水深、氧化还原条件、古气候、古盐度的演化历史; ②韩江 15 洼始新统沉积期主要以浅水环境为主, 水体富氧, 但文昌组三段水体加深, 以弱氧化环境为主; ③文昌组沉积期气候偏干, 进入恩平期气候向湿润转变; ④韩江 15 洼文昌期受东南方向海侵影响, 水体盐度增高, 但恩平期未受海侵影响, 以淡水环境为主; ⑤根据元素地球化学判别结果、测井相及岩性特征, 综合判识韩江 15 洼始新统文昌组上段 (H4 探井附近区域) 主要为浅水三角洲沉积。上述研究成果及认识, 对于深化韩江凹陷始新世沉积环境的认识及海侵影响分析等均具有一定的指导及参考意义。

关键词: 元素地球化学; 沉积古环境; 浅水三角洲; 始新统; 韩江 15 洼

中图分类号:P744.4 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022010901

Application of element geochemistry in paleoenvironment reconstruction in new area: A case study of Hanjiang 15 Subsag in Pearl River Mouth Basin

HE Yanbing, LEI Yongchang, QIU Xinwei, XIAO Zhangbo, JIA Liankai

Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen 518054, China

Abstract: In this paper, the elemental geochemistry method is used to systematically analyze and study the new drilled H4 in Hanjiang Sag, northeastern Pearl River Mouth Basin. Based on the results of elemental geochemistry analysis, the sedimentary paleoenvironment of Hanjiang 15 Subsag is analyzed in detail. The Eocene sedimentary environment and its vertical evolution process of Hanjiang 15 Subsag are preliminarily discussed and clarified. The following important achievements and understandings are obtained: ① The evolution history of Eocene water depth, oxidation-reduction conditions, paleoclimate and paleosalinity in Hanjiang 15 Subsag is reconstructed. ② The sedimentary period of Eocene in Hanjiang 15 Subsag is mainly shallow water environment, and the water body is rich in oxygen. However, the water body of the third member of Wenchang Formation is deepened, and the weak oxidation environment is the main environment. ③ The climate of Wenchang Formation was dry during the sedimentary period and changed to humid during Enping period. ④ The Wenchang Formation in Hanjiang 15 Subsag was affected by the southeast transgression during the sedimentary period, and the salinity of water increased. However, the sedimentary period of Enping Formation was not affected by the transgression, and the freshwater environment was dominated. ⑤ According to the results of element geochemical discrimination, logging facies and lithologic characteristics, the upper member of Wenchang Formation (near H4 exploration well) of Eocene in Hanjiang 15 Subsag is mainly shallow water delta deposits. The above research results and understandings have certain guidance and reference significance for deepening the understanding of the Eocene sedimentary environment and the analysis of transgression influence in Hanjiang Subsag.

Key words: element geochemistry; sedimentary palaeoenvironment; shallow-water deltas; Eocene; Hanjiang 15 Subsag

资助项目: 中海油重大生产科研项目“珠江口盆地(东部)浅水区古近系油气成藏条件及勘探突破方向”(SCKY-2020-SZ-21)

作者简介: 何雁兵(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事石油地质综合研究工作, E-mail: heyb5@cnooc.com.cn

收稿日期: 2022-01-09; 改回日期: 2022-03-06。 张现荣编辑

韩江凹陷位于珠江口盆地珠一坳陷东北部, 其处于珠江口盆地、台西盆地和台西南盆地交会处(图1a), 其特殊的地理位置使韩江凹陷具有重要的研究意义, 其不仅是研究珠江口盆地珠一坳陷古近系海侵方向和沉积环境演变的重要地区, 同时其研究成果也可为台西盆地、台西南盆地构造演化及沉积特征研究提供重要参考。韩江凹陷作为新区, 油气勘探程度较低, 早期勘探(1979—1990年)以对外合作为主, 国外于1985—1988年相继钻探了H1、H2、H3共3口钻井(图1b), 但均为干井, 合作未取得突破, 外方相继退出区块, 韩江凹陷继而进入漫长的自营勘探阶段。由于资料匮乏, 韩江凹陷整体研究程度薄弱, 烃源潜力、始新统沉积古环境及沉积相类型等问题亟待深化研究。以韩江凹陷为研究靶区的文献较少^[1-4], 钟慧智等^[1]通过重磁资料识别出韩江凹陷内12条基底断裂, 并推测基底岩性主要为中生代岩浆岩、火山岩; 黄虎生等^[2]通过对H2井少量钙质超微化石研究, 认为文昌组超微化石组合隶属于中始新统; 焦鹏^[3]基于碎屑锆石定年明确韩江凹陷海丰28洼早中新世珠江组沉积来自北部的韩江物源; 贺勇^[4]在基于地震资料对韩江15洼新生代构造、演化特征分析的基础上, 宏观预测了新生代可能发育的沉积相类型, 但其预测结果主要基于构造演化分析, 且使用已钻井资料较少, 并未针对古氧相、古盐度、古水深等古环境特征展开具体研究。

珠江口盆地始新统不仅为已证实的优质烃源发育层段, 同时也是现阶段最重要的勘探层系之一^[5-7]。韩江凹陷整体研究程度不高, 而对始新统沉

积古环境研究则更为匮乏, 仅少量文献的部分章节有所涉及^[2, 8-9], 且存在“海相或陆相”分歧。黄虎生^[2]在始新统文昌组发现属于NP15带的钙质超微化石, 指出其为滨浅海相沉积环境; 吴国瑄^[8]在H2井文昌组浮游藻类组合中发现海相沟鞭藻, 认为韩江凹陷始新世有过短暂海侵; 张丽丽^[10]根据钙质超微化石结果, 推断韩江凹陷文昌组沉积晚期为遭受海侵影响的深水湖泊环境。前人关于韩江凹陷始新统沉积环境分析主要基于1987年钻探的H2井的古生物资料展开^[2, 8-9], 但该井缺失恩平组地层, 且钻探的文昌组地层较少(仅74.4 m), 同时该井古生物贫乏, 故始新统古环境判别结果的准确性有待进一步研究。此外, 前人的研究仅停留在海、陆相判别上^[2, 8-9], 而对始新统古氧相、古气候、古盐度、沉积相及古环境纵向演化并未展开研究。2019年在韩江15洼钻探领域风险井H4井, 该井因全井段无油气显示而提前完钻, 完钻层位古近系文昌组(未钻穿), 虽然未达到钻探预期, 但该井钻探地层较为完整, 资料录取相对丰富, 为重新认识韩江凹陷提供了新的资料基础。由于韩江15洼H2井与H4井始新统化石稀少, 仅部分层段达到统计学意义, 且两口井在生态组分上也存在较大差异(H2井见海相沟鞭藻, H4井未见), 因此, 仅借助古生物生态组分无法有效进行古环境判别及古环境演化分析。本文中, 笔者首次在研究区运用元素地球化学方法对韩江15洼沉积古环境进行了详细分析, 系统探讨了韩江15洼始新世沉积环境及其纵向演化过程, 为深化韩江凹陷始新统沉积环境认识及海侵影响研究提供了有力支持。

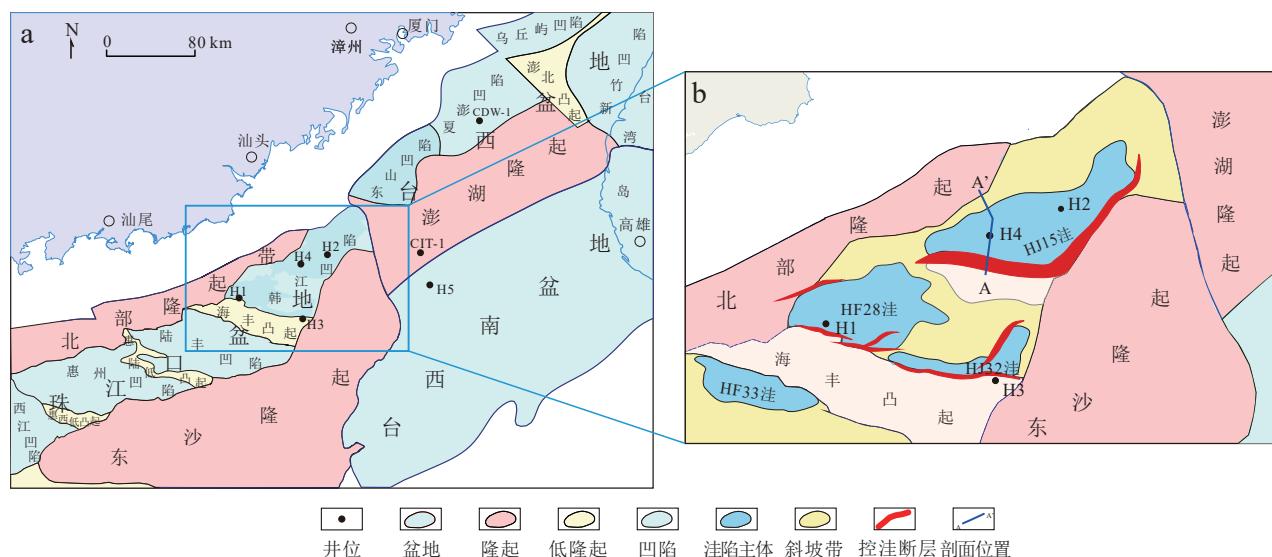


图1 珠江口盆地珠一坳陷构造单元划分(a)及韩江凹陷构造刚要图(b)

Fig.1 Structural unit division of Zhu I depression in Pearl River Mouth Basin (a) and tectonic outline map of the Hanjiang Sag (b)

1 区域地质背景

珠江口盆地是中国南海油气产区之一, 是在燕山期花岗岩及前新生代褶皱基底上发育起来的中—新生代大型沉积盆地^[11-12], 经历了神狐运动、珠琼运动 I 幕、珠琼运动 II 幕等 3 期裂陷活动和南海运动、白云运动等裂后拗陷演化阶段^[13-14], 具有“下断上坳”的结构, 下构造层为裂陷结构, 主要以陆相沉积为主, 包括文昌组和恩平组; 上构造层为拗陷结构, 主要以海相沉积为主, 包括珠海组、珠江组、韩江组和粤海组及第四系^[9](图 2)。韩江凹陷隶属于珠江口盆地珠一坳陷, 凹陷以北为北部隆起, 以南为东沙隆起, 东北为东山—浅滩凹陷, 东南为澎湖隆起, 西南为海丰凸起和陆丰凹陷(图 1a), 面积约 7000 km²。

1.1 构造单元划分

地震及钻井资料揭示, 韩江凹陷在中生代基底之上发育了始新统到第四系的完整地层, 即古新统神狐组(Tg—T90)、始新统文昌组(T90—T80)及恩平组(T80—T70)、渐新统珠海组(T70—T60)、下中新统珠江组(T60—T40)、中中新统韩江组(T40—T32)、上中新统粤海组(T32—T30)、上新统万山组(T30—T20)和第四系(图 2)。

南海北部珠一坳陷的伸展始于中生代晚期古太平洋板块的俯冲后撤, 始新世中期印支板块与欧亚板块的硬碰撞, 导致华南陆缘旋转挤出, 珠琼运动一幕开始发育, 南海北部陆缘整体处于 NW—SE 向伸展环境, 进入恩平期, 受印支地块挤出和古南海俯冲影响, 开始珠琼二幕的裂陷作用, 伸展方向顺时针转变为近 SN 方向^[5, 15-16]。珠琼一幕到珠琼二幕构造运动, 伸展应力转变, 导致韩江凹陷裂陷早期 NE、NEE 向断裂向裂陷晚期近 EW、NWW 向断裂转变。韩江地区各次洼古近系控洼断裂主要为 NE、NWW 方向, 这两组断裂相交, 其中, NWW 向断裂占优(图 1b)。结合断裂形态及文昌组厚度分布, 把韩江凹陷划分为韩江 15 洼(又称韩江主洼)、海丰 28 洼、韩江 32 洼 3 个次级洼陷(图 1b), 其文昌组最大残留厚度分别为 4200、2800、2600 m(据内部资料), 韩江 15 洼文昌组的厚度及面积均最大, 为韩江凹陷的主要沉积和沉降中心, 勘探潜力较大。

1.2 洼陷结构

韩江 15 洼受边界断裂控制, 表现为地堑—半地堑结构, 可划分为低凸起、陡坡带、洼陷带、北部隆

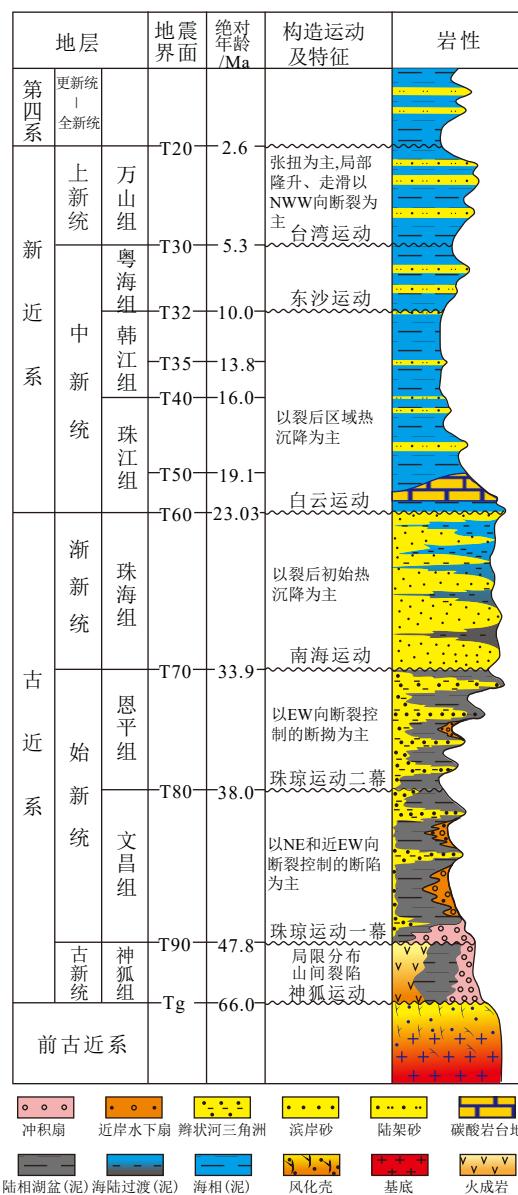


图 2 珠江口盆地珠一坳陷地层综合柱状图
Fig.2 Stratigraphic comprehensive histogram of Zhu I depression in Pearl River Mouth Basin

起带等结构单元(图 3)。由过井的典型地震剖面可见, 韩江 15 洼文昌期表现为地层等厚的地堑式结构, T80 为重要区域不整合界面, 其下部的始新统地层与上覆地层呈角度不整合接触(图 3), 其中, 文一段(T81—T80)受挤压作用, 经历强烈的地层抬升剥蚀作用。古新世为韩江凹陷的初始发育期, 始新世为凹陷发育的鼎盛期, 地层最厚, 且纵向上表现为厚文昌组、薄恩平组特征, 进入渐新世以后, 凹陷开始进入区域沉降阶段, 地层分布稳定。平面上古近系地层整体呈现南厚北薄特征, 沉降中心位于南部边界大断层附近(图 1b、图 3), 进入区域沉降阶段, 地层分布稳定, 沉积了由北往南逐渐增厚的席状披覆沉积地层。

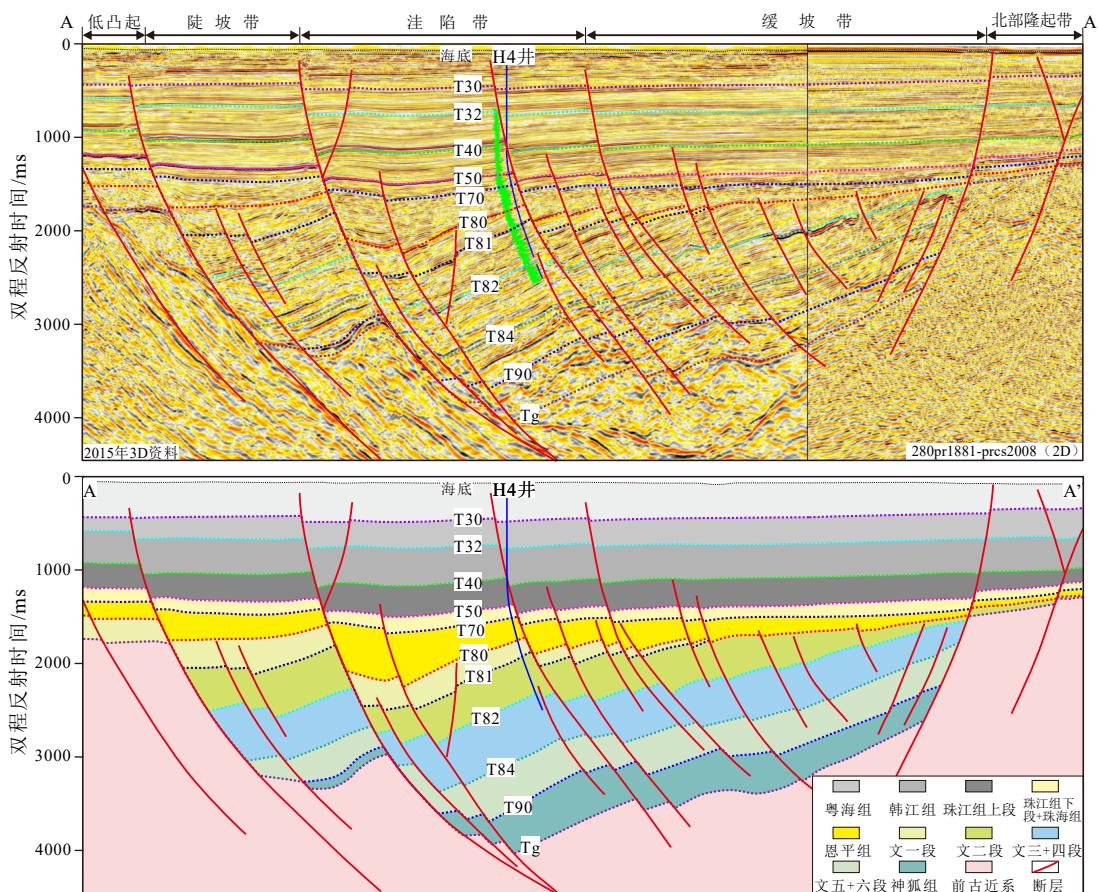


图3 过韩江15洼地震解释及地层充填剖面

A-A'剖面位置见图1b。

Fig.3 Seismic interpretation and stratigraphic filling profile of Hanjiang 15 Subsag

The station of the profile A-A' is shown in fig.1b.

2 始新统沉积古环境

韩江15洼仅有2口钻井，即H2、H4井。H2井钻探于1987年，钻揭始新统地层较少，缺失恩平组，仅钻遇74.4 m文昌组；H4井钻探于2019年，钻揭始新统较厚(1799 m)，且层序相对完整。古生物资料常被用于古环境判别，H2井文昌组1549.8 m深度点(图4)样品中见生活于淡水环境的盘星藻、咸水环境的海相沟鞭藻以及少量微咸水环境的百色藻和球藻^[8]；在文昌组岩心样中(1547.85~1548.90 m)发现丰度及分异度极低的NP15-NP16带钙质超微化石，为 *reticulofenestrid* 类，属于中始新统，而NP15-NP16带化石在台西南盆地较为发育，反映海相环境。H2井文昌组虽见反映咸水及微咸水环境的古生物，但由于其数量过少，借此无法准确判别始新统是否受海侵影响，且海侵程度及时间也无法明确。此外，该井缺失恩平组地层，已有资料仅可为始新统文昌组局部环境变化研究提供借鉴，但无法

进行始新统纵向环境演化分析。

新钻井H4井虽钻揭较厚始新统，但全井段古生物含量偏低，恩平组、文一段化石稀少，未达到统计学意义，文二段、文三段浮游藻类含量整体偏低，仅局部含量中等(图4)，浮游藻类以淡水盘星藻为主，指示淡水沉积环境。此外，H4井仅发育少量指示微咸水环境的球藻，未见海相沟鞭藻，而H2井见少量海相沟鞭藻，表明两口井在古盐度上也存在差异，由于两口钻井古生物资料匮乏，借助该资料无法对始新统水体微咸化原因及不同层位盐度差异进行判别。元素地球化学是判定和恢复沉积古环境的重要手段，可有效解决上述问题。

2.1 元素分析及沉积环境指示意义

在不同沉积环境中，沉积物与沉积介质之间发生各种复杂的化学反应，化学元素会发生沉积、分离、组合等，从而使不同的沉积环境有着不同的化学元素含量和组合，因此，可利用元素地球化学方法来恢复沉积古环境^[17-23]。本次研究选用H2井、

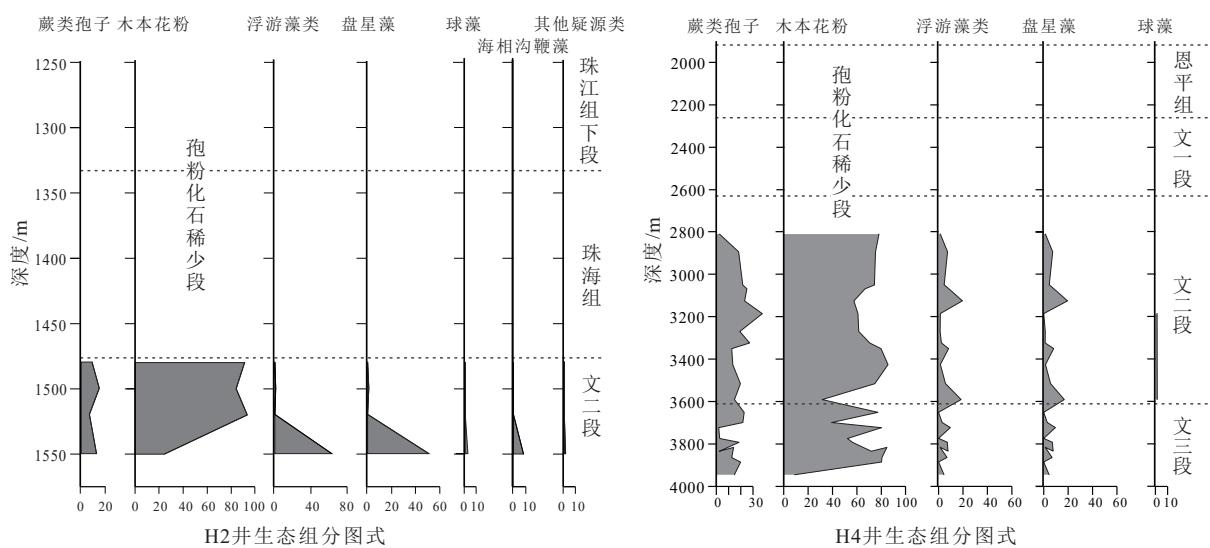


图 4 韩江 15 沟已钻井生态组分分布

Fig.4 Distribution map of drilled ecological components in Hanjing 15 Subsag

H4 井及 CIT-1 井共计 136 个泥岩样品的主微量元素测试数据对始新统沉积环境特征进行分析。采用 Sr/Ba 、 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 与 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 地球化学指标判别古盐度, 选取 U/Th 、 Ni/Co 与 δO 指标来分析古氧相, 选取 MnO/TiO_2 、 Mn/Fe 指标判别水深, 采用 CIA、Ti、P 指标判别古气候(图 5)。

2.1.1 古盐度

锶钡比是判别海、陆相沉积环境的重要指标之一^[17, 24], 淡水沉积物中 Sr/Ba 值 < 1 , 而海相沉积物中 Sr/Ba 值 > 1 , Sr/Ba 值 $1.0 \sim 0.6$ 为半咸水相^[25]。需要注意的是, Sr/Ba 值区分海陆相的界限值在不同地区不都是相同的, 因为 Sr 、 Ba 含量数值各地相差很大, 在珠江三角洲现代代表层样的 Sr/Ba 比值虽有向海方向增加的趋势, 但其比值很小(< 0.3), 主要是因为 Sr 含量偏低所致^[26]。Nelson^[27]通过测定现代与古代沉积的磷酸盐组分($\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$), 证实其与盐度成正比关系。蓝先洪^[26]通过对珠江三角洲 24 个钻孔的 228 个样品及 41 个现代代表层样品的元素研究, 认为在珠江三角洲地区用 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 比值区分海陆相是可行的, 并指出 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 比值 < 0.40 为陆相, > 0.8 为海相。刘宝珺等^[28]、赵其渊等^[29]认为沉积水介质盐度与 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 值之间呈线性关系。陈建强等^[30]对比总结古代海相、湖相磷酸盐沉积物后, 发现 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 值与盐度值呈现约 35 倍的正相关关系。本研究区靠近珠江三角洲地区, Sr/Ba 值存在整体偏低的特征, 故其比值主要用于定性判别古盐度的相对高低, 而定量判别指标选用 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 比值。镁铝比值($m = 100 \times \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$)是判别古盐度变化的良好指标, $m < 1$ 时代表淡水

环境; $1 < m < 10$ 时, 指示海陆过渡沉积环境; $10 < m < 500$ 时, 为海水环境, 当 $m > 500$ 时, 则为陆表海环境或潟湖沉积环境^[17, 31-32]。

H4 井 Sr 含量偏低, Sr/Ba 比值均远小于 0.1, 平均值仅为 0.05, 而该井下珠江组海相泥岩 Sr/Ba 均值仅为 0.14, 小于 1, 证实在研究区 Sr/Ba 比值不能真正反映古盐度, 其海陆指相意义欠佳, 仅用于纵向盐度变化辅助分析, 盐度判别主要用 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 比值。

选用 H4 井泥岩样品的主微量元素分析值对韩江 15 沟始新统沉积古环境进行分析, 其中, 恩平组泥岩样 6 个, 文一段、文二段、文三段泥岩样品数分别为 2、15、8 个。文三段 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 值为 0.42~0.78, 平均值为 0.55, 指示整体以陆相沉积为主, 但水体具有一定盐度, 为淡水-微咸水; 文二段 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 值为 0.22~0.71, 平均值为 0.48, 指示以淡水为主, 但其顶部、底部 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 值增高, 比值 > 0.4 , 水体为微咸水(图 5); 而恩平组 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 值为 0.04~0.18, 平均值为 0.1, 指示古水体为淡水环境(图 6)。

文昌组 Sr/Ba 平均值为 0.05, 恩平组均值为 0.03, 文昌组镁铝比值 m 平均为 9.48, 恩平组均值为 3.11, 均指示文昌组水体盐度高于恩平组, 且两者的纵向变化趋势与 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 值高度一致, 揭示从文三段到恩平组, 盐度总体上逐渐降低, 但局部有短暂、小幅升高, 升高段主要集中在文三段中下部、文二段底部、顶部, 其中, 文三段水体盐度相对最高(图 5)。整体呈现出文昌组微咸化、恩平组淡水环境, 古盐度逐渐降低的变化特征。

2.1.2 古氧相

沉积环境的氧化还原程度影响有机质和微量

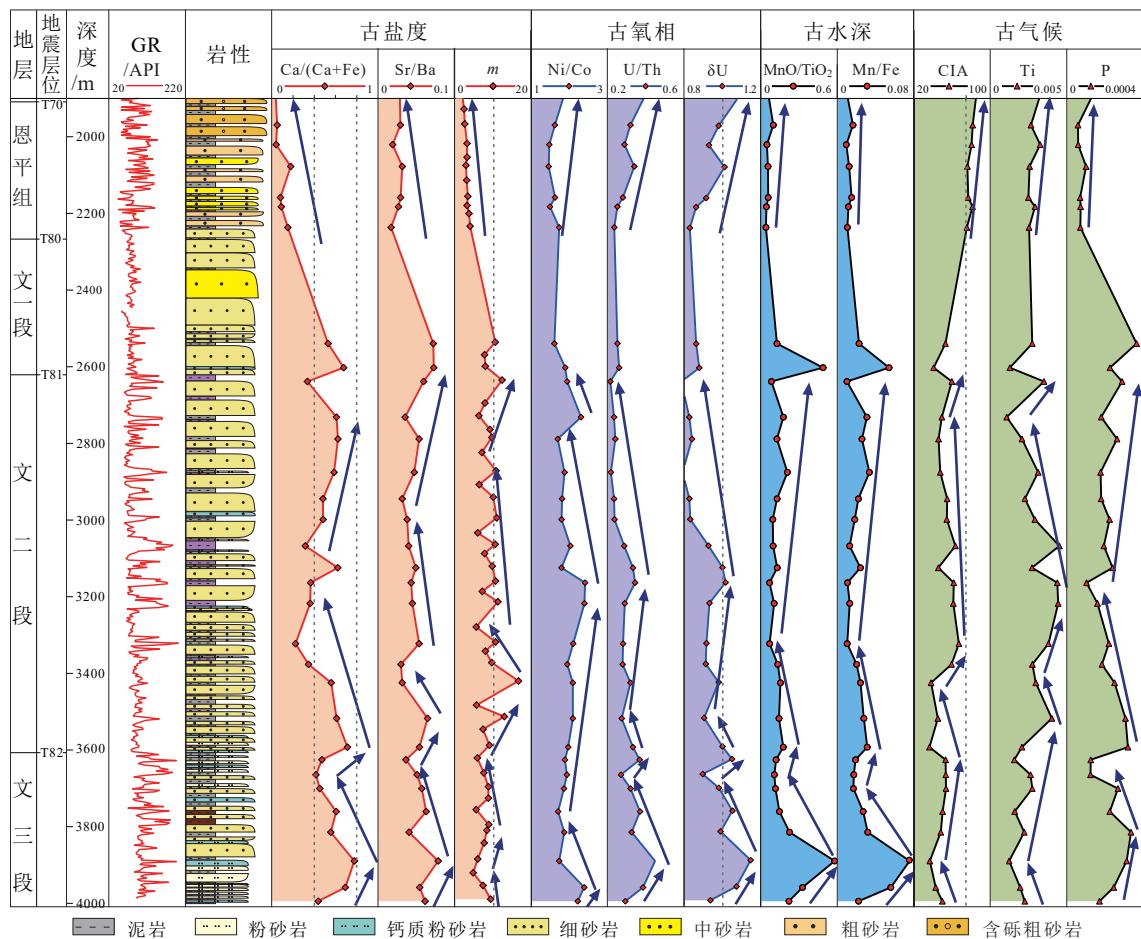


图 5 H4 井始新统古环境判别指标纵向变化

Fig.5 Vertical variation of paleoenvironment discrimination index of Eocene in well H4

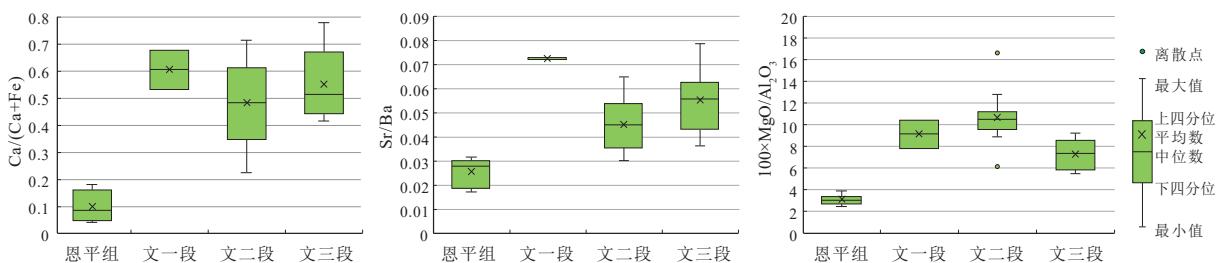


图 6 H4 井始新统古盐度地化参数纵向变化

Fig.6 Vertical variation of paleosalinity geochemical parameters of Eocene in well H4

元素的富集,不同氧化还原敏感元素的敏感度有差异,通过这种差异可以对水体的氧化还原环境进行判定^[33]。U、Th、V、Cr、Ni等为氧化还原性敏感元素,U/Th与Ni/Co值对沉积环境的氧化还原性判别效果较好^[17, 22, 34-35],U/Th<0.75为富氧环境,0.75~1.25为弱氧化环境,>1.25为缺氧环境;Ni/Co值<5为富氧环境,5~7为弱氧化环境,>7为缺氧环境^[36-38]。 $\delta U=2U/(U+Th/3)$, $\delta U>1$ 指示缺氧环境,当 $\delta U<1$ 指示富氧环境^[17]。

H4 井文三段 U/Th 值为 0.27~0.45, 平均值 0.35, 文二段 U/Th 值为 0.22~0.34, 平均值 0.28, 文一段为

0.25~0.26, 平均值为 0.26, 恩平组为 0.24~0.34, 平均值为 0.29(图 7), 文昌组、恩平组 U/Th 比值均小于 0.75, 指示始新统水体为富氧环境。文三段 Ni/Co 值为 1.72~2.40, 平均值为 1.96, 文二段为 1.71~2.42, 平均值为 2.03, 文一段为 1.62~1.90, 平均值为 1.76, 恩平组为 1.47~1.74, 平均值为 1.58(图 7), 文昌组、恩平组 Ni/Co 均值小于 5, 为富氧环境。文三段 δU 值为 0.90~1.15, 平均值为 1.02, 文二段为 0.79~1.02, 平均值为 0.90, 文一段为 0.86~0.88, 平均值为 0.87, 恩平组为 0.83~1.01, 平均值为 0.92(图 7), 表明除文三段显示为弱氧化-弱还原环

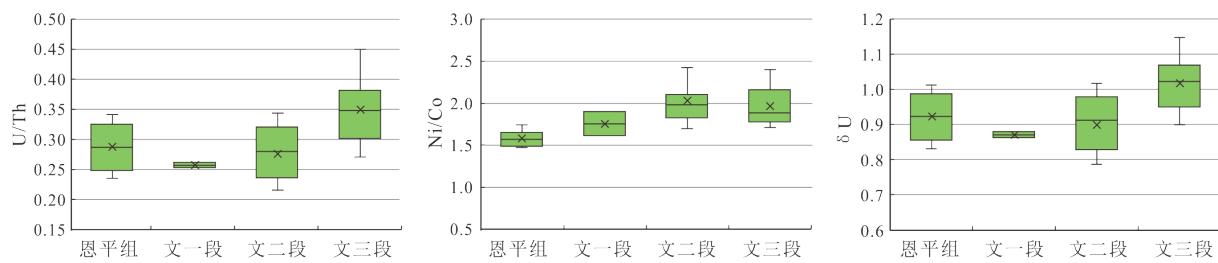


图 7 H4 井始新统泥岩古氧相地化参数纵向变化

Fig.7 Vertical variation of paleo-oxygen geochemical parameters of Eocene mudstone in well H4

境, 总体显示为富氧环境。

纵向上, 始新统整体为偏氧化沉积环境, 但各段氧化性强弱略有差异(图 5)。文三段氧化性最弱, 进入文二段氧化性先减弱后增强, 进入文一段氧化性继续增强, 进入恩平组, 氧化性快速减弱。

2.1.3 古水深

不同元素在沉积物搬运过程中稳定性不同, Fe、Al、Ti 的稳定性相对较弱, 在滨岸带富集, Mn、Ca、Mg 等元素可以长距离运移, MnO/TiO_2 、 Mn/Fe 比值可以作为离岸远近分析的定性指标^[39-40]。 $MnO/TiO_2 < 0.5$ 时, 为距陆地较近的边缘浅海环境, 比值 $0.5 \sim 3.5$, 代表远离大陆的深海环境^[17]。Fe 极易受氧化而成 Fe^{3+} , Fe^{3+} 在 $pH > 3$ 时, 易形成 $Fe(OH)_3$ 的沉淀, 故 Fe 的化合物易在浅水环境聚集, 而 Mn 却能在离子溶液中比较稳定地存在, 能更好地在水深较大的环境发生聚集, 因此随着沉积水体深度的增大, Fe 元素含量普遍降低, Mn/Fe 值增大^[41]。

H4 井文昌组、恩平组 MnO/TiO_2 均值分别为 0.17、0.06, 皆小于 0.5, 指示始新统沉积期水体整体偏浅。 Mn/Fe 值与 MnO/TiO_2 纵向变化趋势高度一致(图 5), 指示文三段沉积期水深自底部向上部, 水深先增加后减小; 进入文二段后, 水深先缓慢变浅, 之后缓慢变深, 但整体变化幅度较小, 以浅水为主, 文一段保持浅水环境; 进入恩平组后, 水深略有增加, 但仍保持浅水环境。综上, 文昌组、恩平组水体整体为浅水环境, 但局部水深有所增大, 其中文三段水深相对最大。

2.1.4 古气候

化学蚀变指数(CIA)是通过沉积岩的化学组分变化来识别源区气候条件的较为有效的方法^[42], CIA < 70, 反映寒冷、干旱气候, CIA 值为 70 ~ 75, 反映温暖、湿润气候, CIA > 75, 代表炎热、潮湿条件下的强烈的化学风化作用^[43-44]。Ti 元素含量变化可反映陆源物质输入程度, 该值高则表明陆源物质含量愈丰富, 指示一种温暖潮湿的气候背景, 沉积岩中 P 的高含量指示干旱高盐度环境的气候背景,

低含量则指示潮湿的气候背景^[45]。

H4 井文昌组 CIA 值为 36.6 ~ 67.3, 均值 51.4, 指示文昌组整体为干燥气候。其中, 文三段 CIA 值为 37 ~ 53.9, 均值 48.8; 文二段 CIA 值为 36.6 ~ 67.3, 均值为 52.9; 文一段 CIA 为 41.1 ~ 53.3, 均值 47.2。恩平组 CIA 为 75.7 ~ 81.8, 均值为 78.8, 指示温暖、湿润气候。H4 井 Ti 含量变化与 CIA 含量变化有较好的相关性, 与 P 含量变化有较好的负相关性(图 5), 文三段表现为 P 相对富集, Ti 元素相对贫乏, 指示干旱气候, 进入文二段保持干旱气候, 但文二段中段沉积期, Ti 含量增加, P 含量减少, 表明气候短暂向温湿转变, 进入恩平组后, P 元素快速减少, Ti 元素逐渐增加, 转变为温暖湿润气候。始新统古气候变化与古盐度变化对比发现, 即在文昌期, 古气候与古盐度基本保持同步变化(图 5), 即干旱气候对应高盐度, 说明古气候对古盐度变化有一定影响, 但进入恩平期后, 这种同步关系变差。

2.2 始新统水体微咸化成因探讨

韩江 15 沟文昌组水体具微咸化特征, 推测为受海侵影响所致。韩江 15 沟东南侧的 H5 井(图 1a)位于台西南盆地北部坳陷带, 该井发育早、中始新统, 缺乏晚始新统, 地层中见有孔虫、钙质超微化石, 推测始新世受到断陷作用影响导致海水入侵^[46]。位于澎湖-北港隆起上的 CIT-1 井(图 1a)缺失晚始新统, 在早始新统中见海相沟鞭藻, 在部分砂岩中含海绿石, 且早始新统 87 个样品的 $Ca/(Ca+Fe)$ 平均值为 0.75(图 8), 接近海相判别界限值 0.8, 指示水体盐度较高, 表明始新统早期海侵已影响至台西盆地的澎湖隆起。此外, 该井 Sr/Ba 平均值为 0.62, 其值远高于 H2 及 H4 井(图 8), 表明早始新统沉积期澎湖-北港隆起受海侵影响程度远高于韩江凹陷。

台西盆地夏澎坳陷位于韩江凹陷东北侧(图 1a), 其始新世主裂陷期以湖相沉积环境为主, 中—晚始新世来自东南方向的海侵进一步加强, 覆盖到夏澎坳陷, CDW-1 井中—晚始新统中出现的钙质超微化

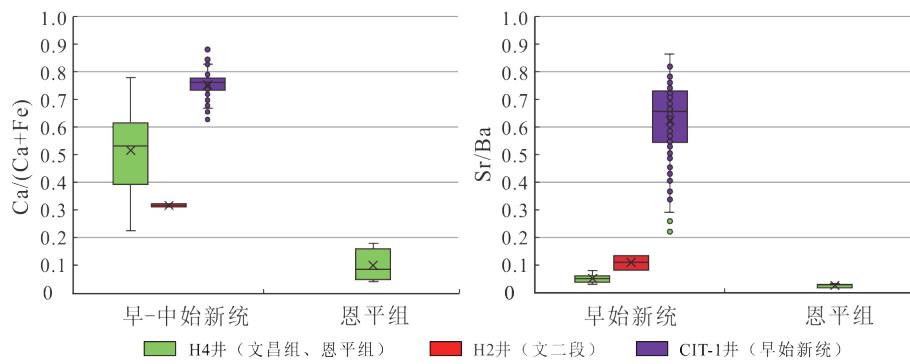


图 8 韩江 15 洼及周边已钻井古盐度指标对比

Fig.8 Comparison of paleosalinity indexes of drilled wells in and around Hanjiang 15 subsag

石 NP15-NP16 带及鲕粒状砂岩也证实了这一点^[47]。李健等^[48]认为台西盆地乌丘屿凹陷始新统为海岸平原相-浅海相泥岩为主的沉积建造,其中始新世中期有一次大规模的海侵。

台西南盆地早—中始新世已为海相沉积环境,而台西盆地在中—晚始新世受海侵影响加强^[47],周邻凹陷、盆地沉积环境分析证实,始新世韩江凹陷具备海侵的条件。从台西南盆地 H5 井向台西盆地 CIT-1 井至韩江 15 洼 H4 井,古盐度指标及海相古生物数量逐步减少,表明韩江 15 洼海侵方向应来自东南方向的台西南盆地,海侵时间为始新世中—晚期,但海侵影响范围有限,受影响时段主要集中在文三段,而恩平组并未受到海侵影响,以淡水沉积为主。

3 始新统沉积相

H4 井未进行钻井及井壁取心,故岩性确定主要来自录井资料。始新统恩平组录井岩性为薄—厚层浅灰色含砾粗砂岩、中—细砂岩与中—厚层灰色泥岩不等厚互层。始新统文昌组一段为中厚—巨厚层浅灰色中砂岩、细砂岩,夹薄层泥岩;文昌组二段上部以中厚—巨厚层细砂岩为主,夹灰色、褐红色泥岩,下部为薄—中厚层细砂岩、泥质细砂岩与灰色泥岩不等厚互层(图 9);文昌组三段为薄—中厚层浅灰色细砂岩、泥质粉砂岩、灰白色灰质粉砂岩、薄—中厚层灰色泥岩,夹少量褐色、褐红色泥岩。

浅水三角洲多发育于大型坳陷湖盆中,但在断陷湖盆萎缩期或裂陷初期也存在浅水三角洲沉积^[49-52]。边界断层活动强度降低是断陷湖盆发育浅水三角洲的先决条件,大型浅水三角洲沉积通常发育于构造稳定、地形平缓且供源充足的浅水区^[51]。文一段+文二段沉积期,韩江凹陷处于早期裂陷萎

缩期,边界断层活动强度减弱,沉降幅度变小。边界断层活动强度的减弱为文一段+文二段的“填平补齐”及地层平缓稳定的沉积背景创造了条件,具备发育浅水三角洲的沉积背景。沉积时水体的深浅是判断浅水三角洲沉积的重要因素^[53]。文昌组上段泥岩颜色以灰色、褐红色为主,且两者交互出现(图 9),褐红色为较典型氧化色,文一+文二段杂色泥岩的发育,表明其沉积时水深不大,岸线涨落动荡频繁,符合浅水三角洲的沉积特征。韩江 15 洼文昌期水底地形平坦(H4 井区现今坡度 1.9°),元素、有机地化分析皆指示沉积水体偏浅(见前文),具备发育浅水三角洲的条件。

浅水三角洲由于湖水较浅,一般以河流营力为主,湖水改造作用较弱,以河流砂体为主,水下分流河道砂岩相对发育。此外,浅水三角洲建设性较强,使河道进积速度快,在进积过程中对原河口沉积物具有较强的改造作用,使发育的河口坝不能较好地保存,从而使河口坝的规模和分布局限^[53-54]。H4 井文昌组自然伽马(GR)曲线主要为指示水下河道沉积的箱型或齿化箱形,少量指示席状砂的指状,其中,三角洲水下分流河道构成了文昌组最主要的砂体类型,而指示河口坝的反韵律特征相对少见(图 9)。相对干旱气候条件下常形成枝状分流河道型浅水三角洲,主要微相为水下分流河道,相对湿润气候条件下,易形成网状叠置河道型浅水三角洲^[55]。韩江 15 洼文昌组气候偏干旱,仅文二段中部气候短暂向温湿转变,故主要发育枝状分流河道型浅水三角洲(图 10a)。综合元素地化、测井相及岩性分析,认为文昌组上段发育浅水三角洲沉积(图 10b)。此外,文昌组从顶部到底部,整体由浅水三角洲平原“无泥”间断正韵律向前缘“有泥”间断正韵律演变,文一段主要为浅水三角洲平原亚相,文二段为平原—内前缘亚相,文三段主要为外前缘亚相(图 9)。

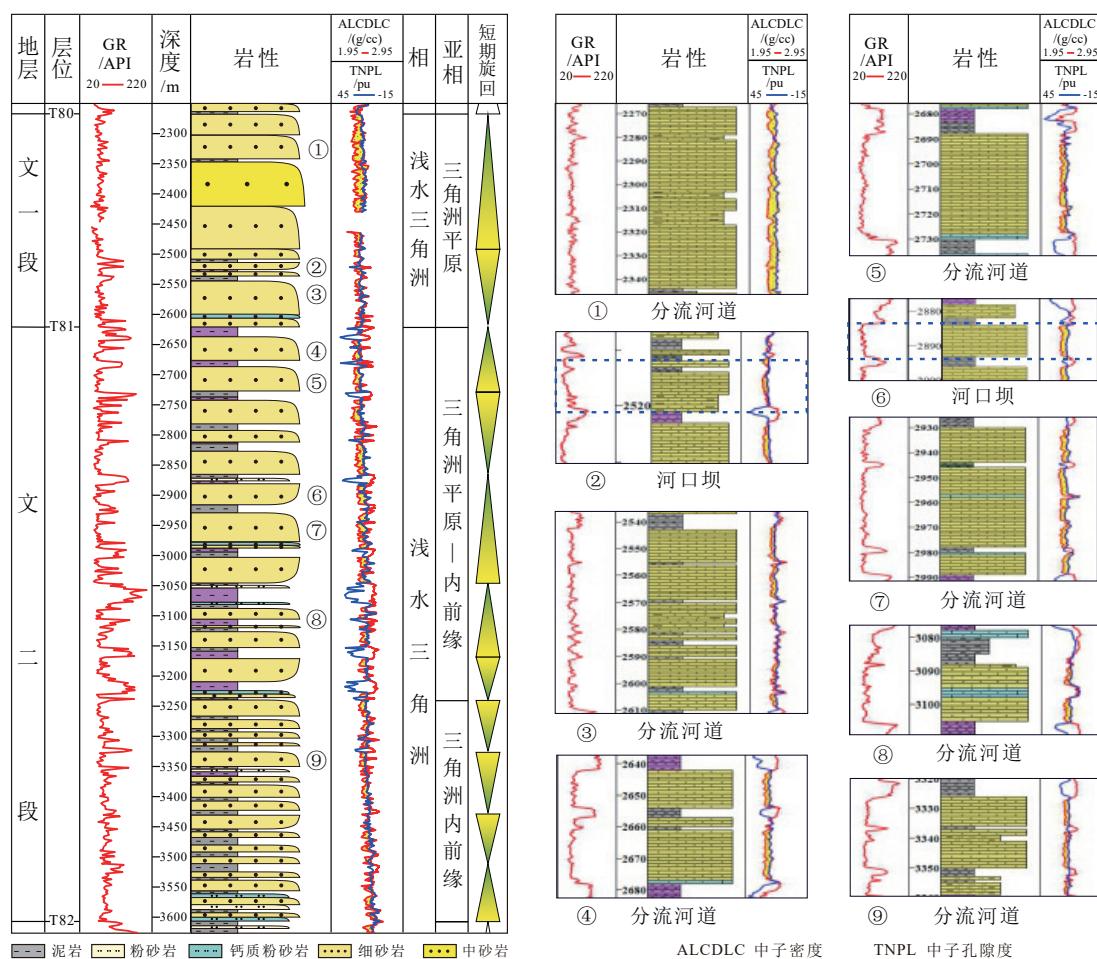
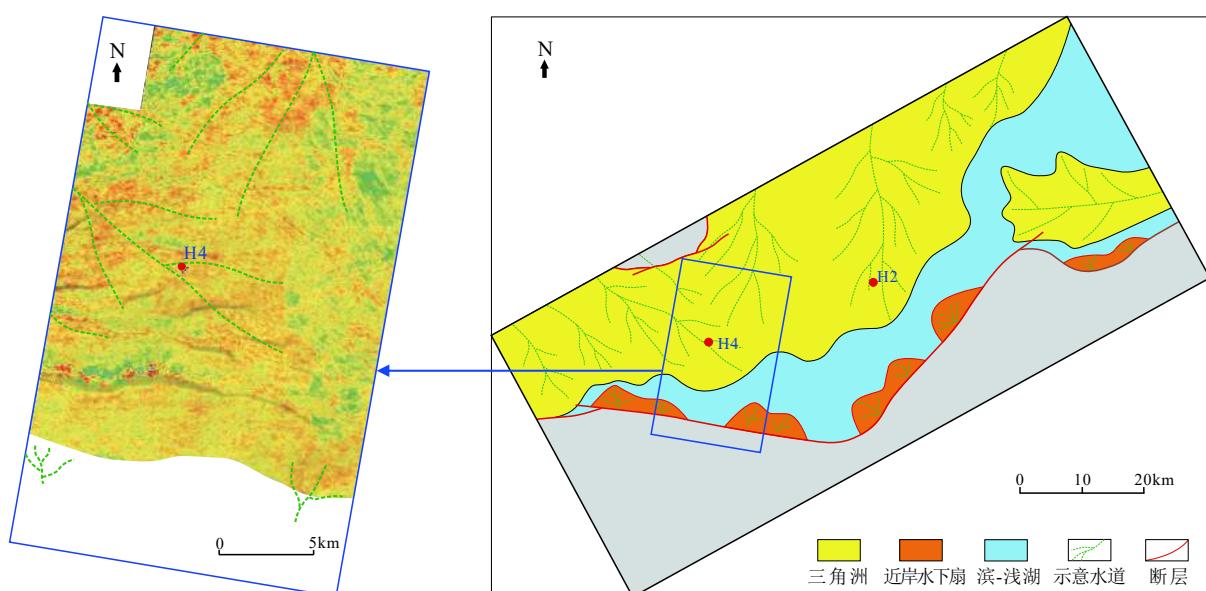


图9 韩江15洼H4井文一段+文二段综合柱状图

Fig.9 Composite stratigraphic column of 1th-2th Member Wenchang Formation of theWell H4
in the Hanjiang 15 Subsag



a. 韩江15洼文一+文二段 (T82-T80) 均方根振幅

b. 韩江15洼文一+文二段 (T82-T80) 沉积相图

图10 珠江口盆地韩江15洼文一段+文二段均方根振幅(a)及沉积相图(b)

Fig.10 Root mean square amplitude and sedimentary facies of 1th+2th Member Wenchang Formation in
Hanjiang 15 Subsag, Pearl River Mouth Basin

4 结论

(1) 韩江 15 洼文昌组、恩平组以浅水、富氧环境为主, 局部层段水体有所增大、还原性增强。文三段沉积期水深相对最大, 但仍以浅水为主, 为弱氧化-弱还原环境; 文二段水深先变浅后逐步变深, 氧化性先减弱后增强, 整体以富氧环境为主; 进入恩平组, 保持浅水环境, 但氧化性减弱, 以弱氧化环境为主。古气候分析表明始新统文昌组沉积期气候偏干, 进入恩平期气候向湿润转变。

(2) 韩江 15 洼始新统主要为陆相沉积, 但文昌期受海侵影响, 海侵应来自东南方向, 海侵时间为始新世中—晚期, 海侵影响范围有限, 受影响层段主要集中在文三段, 其盐度值最高, 其次为文二段、文一段, 而恩平组并未受到海侵影响, 以淡水沉积为主。

(3) 根据元素地球化学判别结果、测井相及岩性特征, 综合判识韩江 15 洼始新统文昌组上段 (H4 探井附近区域) 主要为浅水三角洲沉积。

参考文献 (References)

- [1] 钟慧智, 李平鲁. 韩江凹陷重磁资料综合地球物理解释[J]. 中国海上油气(地质), 1996, 10(5): 55-62. [ZHONG Huizhi, LI Pinglu. Comprehensive geophysical interpretation from gravity - magnetic data in Hanjiang sag [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1996, 10(5): 55-62.]
- [2] 黄虎生, 钟碧珍. 珠江口盆地中始新统文昌组钙质超微化石新知[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(1): 31-35. [HUANG Lusheng, ZHONG Buzhen. New materials of the calcareous mannofossil in the middle Eocene Wenchang formation from the Pearl river mouth basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1998, 12(1): 31-35.]
- [3] 焦鹏, 郭建华, 王玺凯, 等. 珠江口盆地韩江-陆丰凹陷珠江组下段碎屑锆石来源与储层物源示踪[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 239-253. [JIAO Peng, GUO Jianhua, WANG Xikai, et al. Detrital zircon genesis and provenance tracing for reservoirs in the Lower Zhujiang Formation in Hanjiang-Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 239-253.]
- [4] 贺勇. 珠江口盆地韩江 15 洼构造—沉积演化及生烃潜力[J]. 天然气技术与经济, 2020, 14(6): 14-20. [HE Yong. Tectonic-sedimentary evolution and hydrocarbon-generating potential of Hanjiang 15 sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2020, 14(6): 14-20.]
- [5] 米立军, 张向涛, 庞雄, 等. 珠江口盆地形成机制与油气地质[J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 1-10. [MI Lijun, ZHANG Xiangtao, PANG Xiong, et al. Formation mechanism and petroleum geology of Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 1-10.]
- [6] 汪旭东, 张向涛, 何敏, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷南部文昌组储层发育特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1147-1155. [WANG Xudong, ZHANG Xiangtao, HE Min, et al. Characteristics and controlling factors of reservoir development in the Wenchang Formation, Southern Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1147-1155.]
- [7] 代一丁, 牛子铖, 汪旭东, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷古近系与新近系油气富集规律的差异及其主控因素[J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 41-52. [DAI Yiding, NIU Zicheng, WANG Xudong, et al. Differences of hydrocarbon enrichment regularities and their main controlling factors between Paleogene and Neogene in Lufeng sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 41-52.]
- [8] 吴国瑄, 朱伟林, 黎明碧, 等. 古湖缺氧条件是控制富生油凹陷形成的重要因素: 来自珠江口盆地的证据[J]. 中国海上油气(地质), 1999, 13(1): 3-8. [WU Guoxuan, ZHU Weilin, LI Mingbi, et al. Important factor controlling the development of rich oil kitchen sags: anoxic conditions: Evidences from the Pearl river Mouth basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1999, 13(1): 3-8.]
- [9] 张丽丽. 珠江口盆地揭阳凹陷早渐新世-中新世古生物地层及沉积环境[J]. 微体古生物学报, 2020, 37(3): 266-277. [ZHANG Lili. Early Oligocene—Miocene biostratigraphy and sedimentary environment of the Jieyang sag in Pearl river mouth basin [J]. Acta Micropalaentologica Sinica, 2020, 37(3): 266-277.]
- [10] 张丽丽, 舒誉, 蔡国富, 等. 珠江口盆地东部始新世-渐新世沉积环境演变及对烃源条件的影响[J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 153-165. [ZHANG Lili, SHU Yu, CAI Guofu, et al. Eocene-Oligocene sedimentary environment evolution and its impact on hydrocarbon source conditions in eastern Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 153-165.]
- [11] 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003. [CHEN Changmin, SHI Hesheng, XU Shicai, et al. The condition of forming tertiary reservoir in Pearl River Mouth Basin (East) [M]. Beijing: Science Press, 2003.]
- [12] 周凤娟, 丁琳, 马永坤, 等. 陆丰 13 东洼文昌组碎屑锆石 U-Pb 年龄特征及其物源示踪意义[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 46-55. [ZHOU Fengjuan, DING Lin, MA Yongkun, et al. Detrital zircon U-Pb age characteristics of Wenchang Formation in Lufeng 13 eastern sag and its significance for provenance tracing [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 46-55.]
- [13] 于福生, 汪旭东, 邱欣卫, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷断裂构造特征及“人”字型构造成因[J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 166-177. [YU Fusheng, WANG Xudong, QIU Xinwei, et al. Characteristics of fault structure and the genesis of herringbone structure in Lufeng sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 166-177.]
- [14] 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 1-9. [ZHU Weilin, ZHANG Gongcheng, GAO Le. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 1-9.]
- [15] 朱定伟, 张向涛, 雷永昌, 等. 陆丰北地区构造特征及恩平组勘探方向[J]. 中国海上油气, 2020, 32(2): 44-53. [ZHU Dingwei, ZHANG Xiangtao, LEI Yongchang, et al. Tectonic characteristics of Lufeng North area and the exploration direction of the Enping Formation [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(2): 44-53.]

- [16] 胡阳. 珠江口盆地珠一坳陷新生代盆地结构与成因演化 [J]. 高校地质学报, 2019, 25(1): 81-92. [HU Yang. Basin structure and genetic evolution of the Zhu 1 depression, during the cenozoic, Pearl River Mouth basin, South China [J]. Geological Journal of China Universities, 2019, 25(1): 81-92.]
- [17] 孙小勇, 牟传龙, 葛祥英, 等. 四川广元-陕西镇巴地区上奥陶统五峰组地球化学特征及沉积环境意义 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2016, 36(1): 46-54. [SUN Xiaoyong, MOU Chuanlong, GE Xiangying, et al. Geochemistry and sedimentary environments of the Upper Ordovician Wufeng Formation in Guangyuan, northern Sichuan and Zhenba, southern Shaanxi [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2016, 36(1): 46-54.]
- [18] 朱明, 施辉, 袁波, 等. 淮南四棵树凹陷沉积古环境与物源研究: 来自侏罗系一下白垩统元素地球化学的指示 [J]. *沉积学报*, 2021. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.024. [ZHU Ming, SHI Hui, YUAN Bo, et al. Palaeoenvironment and provenance of the Sikeshu Sag in the Junggar Basin: indications from element geochemical records [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.024.]
- [19] 肖飞, 赵宗举, 姜在兴, 等. 京西地区寒武系凤山组地球化学特征及古环境意义 [J]. *沉积学报*, 2020, 38(3): 661-675. [XIAO Fei, ZHAO Zongju, JIANG Zaixing, et al. Geochemical characteristics and their paleoenvironmental significance for the Cambrian Fengshan formation in the western Beijing Area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(3): 661-675.]
- [20] Bowen H J M. Environmental Chemistry of the Elements [M]. London: Academic Press, 1979.
- [21] Gasse F, Fontes J C, Plaziat J C, et al. Biological remains, geochemistry and stable isotopes for the reconstruction of environmental and hydrological changes in the Holocene lakes from North Sahara [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1987, 60: 1-46.
- [22] Elderfield H, Upstill-Goddard R, Sholkovitz E R. The rare earth elements in rivers, estuaries, and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(4): 971-991.
- [23] Sholkovitz E R. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries [J]. *Aquatic Geochemistry*, 1995, 1(1): 1-34.
- [24] 罗顺社, 吕奇奇, 李琳静, 等. 燕山地区宣龙坳陷洪水庄组和铁岭组沉积环境 [J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(2): 10-16. [LUO Shunshe, LV Qiqi, LI Linjing, et al. Depositional environment of Hongshuizhuang and Tieling formations in the Xuanlong depression, Yanshan region [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(2): 10-16.]
- [25] 王敏芳, 黄传炎, 徐志诚, 等. 综述沉积环境中古盐度的恢复 [J]. *新疆石油天然气*, 2006, 2(1): 9-12. [WANG Minfang, HUANG Chuanyan, XU Zhicheng, et al. Review on paleosalinity recovery in sedimentary environment [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2006, 2(1): 9-12.]
- [26] 蓝先洪, 马道修, 徐明广, 等. 珠江三角洲若干地球化学标志及指相意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(1): 39-49. [LAN Xianhong, MA Daoxiu, XU Mingguang, et al. Some geochemical indicators of the Pearl river delta and their facies significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1987, 7(1): 39-49.]
- [27] Nelson B W. Sedimentary phosphate method for estimating paleosalinities [J]. *Science*, 1967, 158(3803): 917-920.
- [28] 刘宝珺, 曾允孚. 岩相古地理基础和工作方法 [M]. 北京: 地质出版社, 1985: 220-221. [LIU Baojun, ZENG Yunfu. Foundation and Working Methods of Lithofacies and Palaeogeography [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 220-221.]
- [29] 赵其渊. 海洋地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1989. [[ZHAO Qiyuan. Marine Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.]
- [30] 陈建强, 周洪瑞, 王训练. 沉积学及古地理学教程 [M]. 北京: 地质出版社, 2004. [CHEN Jianqiang, ZHOU Hongrui, WANG Xunlian. Sedimentology and Sedimentary Palaeogeography [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.]
- [31] 宫少军, 秦志亮, 叶思源, 等. 黄河三角洲ZK5钻孔沉积物地球化学特征及其沉积环境 [J]. *沉积学报*, 2014, 32(5): 855-862. [GONG Shaojun, QIN Zhiliang, YE Siyuan, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of ZK5 core sediments in Yellow River delta [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(5): 855-862.]
- [32] 李圯, 刘可禹, 蒲秀刚, 等. 沧东凹陷孔二段混合细粒沉积岩相特征及形成环境 [J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3779-3796. [LI Yi, LIU Keyu, PU Xiugang, et al. Lithofacies Characteristics and formation environments of mixed fine-grained sedimentary rocks in second member of the Kongdian Formation in the Cangdong Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3779-3796.]
- [33] 付勇, 周文喜, 王华建, 等. 黔北下寒武统黑色岩系的沉积环境与地球化学响应 [J]. *地质学报*, 2021, 95(2): 536-548. [FU Yong, ZHOU Wenxi, WANG Huajian, et al. The relationship between environment and geochemical characteristics of black rock series of Lower Cambrian in northern Guizhou [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(2): 536-548.]
- [34] 王成善, 胡修棉, 李祥辉. 古海洋溶解氧与缺氧和富氧问题研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(3): 39-48. [WANG Chengshan, HU Xiumian, LI Xianghui. Dissolved oxygen in palaeo-ocean: anoxic events and high-oxic problems [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(3): 39-48.]
- [35] Emerson S R, Huested S S. Ocean anoxia and the concentrations of molybdenum and vanadium in seawater [J]. *Marine Chemistry*, 1991, 34(3-4): 177-196.
- [36] Jones B, Manning D A C. Manning. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1-4): 111-129.
- [37] 倪善芹, 侯泉林, 王安建, 等. 碳酸盐岩中锶元素地球化学特征及其指示意义: 以北京下古生界碳酸盐岩为例 [J]. *地质学报*, 2010, 84(10): 1510-1516. [NI Shanqin, HOU Quanlin, WANG Anjian, et al. Geochemical Characteristics of Carbonate Rocks and Its Geological Implications: Taking the Lower Palaeozoic Carbonate Rock of Beijing Area as an Example [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(10): 1510-1516.]
- [38] 赵立群, 周尚国, 伊海生, 等. 桂西南下雷锰矿床地球化学特征及沉积环境分析 [J]. *地质与勘探*, 2016, 52(1): 25-39. [ZHAO Liqun, ZHOU Shangguo, YI Haisheng, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of the Xialei manganese deposit in southwest Guangxi [J]. *Geology and Exploration*, 2016, 52(1): 25-39.]

- [39] 李浩, 陆建林, 李瑞磊, 等. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素[J]. 地球科学, 2017, 42(10): 1774-1786. [LI Hao, LU Jianlin, LI Ruilei, et al. Generation paleoenvironment and its controlling factors of lower cretaceous lacustrine hydrocarbon source rocks in Changling depression, South Songliao basin [J]. Earth Science, 2017, 42(10): 1774-1786.]
- [40] 周江羽, 陈建文, 张玉玺, 等. 下扬子地区幕府山组古环境和构造背景: 来自细粒混积沉积岩系元素地球化学的证据[J]. 地质学报, 2021, 95(6): 1693-1711. [ZHOU Jiangyu, CHEN Jianwen, ZHANG Yuxi, et al. Paleoenvironment and tectonic background of Mufushan Formation in Lower Yangtze area: evidence from geochemistry of fine-grained mixed-siliciclastic-calcareous deposits [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(6): 1693-1711.]
- [41] 梁兴, 陈科洛, 张廷山, 等. 沉积环境对页岩孔隙的控制作用: 以滇黔北地区五峰组—龙马溪组下段为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(10): 1393-1405. [LIANG Xing, CHEN Keluo, ZHANG Tingshan, et al. The controlling factors of depositional environment to pores of the shales: case study of Wufeng Formation-Lower Longmaxi formation in Dianqianbei area [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(10): 1393-1405.]
- [42] Ross D J K, Bustin R M. Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata: Examples from the Devonian-Mississippian shales, Western Canadian Sedimentary Basin [J]. *Chemical Geology*, 2009, 260(1-2): 1-19.
- [43] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [44] 沈瑞峰, 张辉, 唐勇, 等. 阿尔泰山带古生代地层的地球化学特征及其对沉积环境的制约[J]. 地球化学, 2015, 44(1): 43-60. [SHEN Ruifeng, ZHANG Hui, TANG Yong, et al. Geochemical characteristics of Paleozoic strata and its restriction on depositional environment in Altay orogen, north Xinjiang, China [J]. *Geochimica*, 2015, 44(1): 43-60.]
- [45] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 307-310,314. [LIU Gang, ZHOU Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: Taking Qianjiang formation in the Jianghan basin as an example [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(3): 307-310,314.]
- [46] 李前裕, 吴国瑄, 张丽丽, 等. 古近纪南海断陷作用和破裂不整合的海相沉积记录[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 60(12): 2128-2140. [LI Qianyu, WU Guoxuan, ZHANG Lili, et al. Paleogene marine deposition records of rifting and breakup of the South China Sea: An overview [J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(12): 2128-2140.]
- [47] 雷振宇, 张莉, 骆帅兵, 等. 九龙江凹陷古近系沉积特征及油气资源潜力[C]//2016年全国天然气学术年会论文集. 银川: 中国石油学会天然气专业委员会, 2016. [LEI Zhenyu, ZHANG Li, LUO Shuaibing, et al. Sedimentary characteristics and hydrocarbon resource potential of Paleocene in Jiulongjiang Sag, Taiwan Strait Basin[C]//Yinchuan: Natural Gas Professional Committee of China Petroleum Society, 2016.]
- [48] 李键, 漆滨演, 许怀智, 等. 台西盆地乌丘屿凹陷新生代构造演化特征[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(9): 36-42. [LI Jian, QI Binwen, XU Huazhi, et al. Cenozoic tectonic evolution of Wuqiuyu depression, Taixi basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(9): 36-42.]
- [49] 赵伟, 邱隆伟, 姜在兴, 等. 断陷湖盆萎缩期浅水三角洲沉积演化与沉积模式: 以东营凹陷牛庄洼陷古近系沙三段上亚段和沙二段为例[J]. 地质学报, 2011, 85(6): 1019-1027. [ZHAO Wei, QIU Longwei, JIANG Zaixing, et al. Depositional evolution and model of shallow-water delta in the rifting lacustrine basins during the Shrinking Stage: a case study of the third member and second member of Paleogene Shahejie formation in the Niuzhuang Subsag, Dongying Sag [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(6): 1019-1027.]
- [50] 陈诚, 朱怡翔, 石军辉, 等. 断陷湖盆浅水三角洲的形成过程与发育模式: 以苏丹Muglad盆地Fula凹陷Jake地区AG组为例[J]. 石油学报, 2016, 37(12): 1508-1517. [CHEN Cheng, ZHU Yixiang, SHI Junhui, et al. The forming process and development pattern of shallow water delta in fault depression lacustrine basin: a case study of AG Formation in the Jake area in Fula sag, Muglad Basin, Sudan [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(12): 1508-1517.]
- [51] 李维, 朱筱敏, 马英俊, 等. 陆相断陷湖盆浅水三角洲沉积特征: 以高邮凹陷刘五舍次凹戴南组一段为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(5): 676-683,690. [LI Wei, ZHU Xiaomin, MA Yingjun, et al. Depositional characteristics of a shallow-water delta in a continental faulted basin: a case study of the first member of Dainan Formation, Liuwushe Subsag, Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2018, 40(5): 676-683,690.]
- [52] 范乐元, 吴嘉鹏, 刁宛, 等. 断陷湖盆浅水三角洲沉积特征: 以Muglad盆地Unity凹陷Aradeiba组为例[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 155-166. [FAN Leyuan, WU Jiapeng, DIAO Wan, et al. Sedimentary characteristics of the shallow water delta in rifted lacustrine basin: A case study in the Aradeiba Formation, Unity Sag, Muglad basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(1): 155-166.]
- [53] 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等. 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式: 以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 89-99. [ZHU Xiaomin, LIU Yuan, FANG Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake: example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 89-99.]
- [54] 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 575-582. [ZHU Weilin, LI Jianping, ZHOU Xinhui, et al. Neogene shallow water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai Bay, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(4): 575-582.]
- [55] 杨跃明, 王小娟, 陈双玲, 等. 四川盆地中部地区侏罗系沙溪庙组沉积体系演化及砂体发育特征[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 12-24. [YANG Yueming, WANG Xiaojuan, CHEN Shuangling, et al. Sedimentary system evolution and sandbody development characteristics of Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 12-24.]