

刘新宇, 邵磊, 史德锋, 等. 西沙西科 1 井元素地球化学特征与海平面升降的关系[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(6): 8-17.

# 西沙西科 1 井元素地球化学特征与海平面升降的关系

刘新宇<sup>1,2</sup>, 邵磊<sup>3</sup>, 史德锋<sup>1,2</sup>, 侍文芳<sup>2</sup>, 欧阳杰<sup>1,2</sup>

(1 中海油海南能源有限公司, 海口 570100; 2 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057;

3 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092)

**摘要:**以南海北部西沙群岛石岛碳酸盐岩台地为研究对象, 对 1268 件碳酸盐岩样品进行全岩元素地球化学特征分析, 并结合早中新世以来沉积学特征, 研究其与海平面升降的响应关系。实验结果显示, 该地区常量元素 ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 及微量元素 (B/Ga、Zr/Al、Li、V) 分析的古盐度、古环境氧化还原状态和酸碱度及海平面变化, 与岩石地层学和古生物学分析得到的结论基本一致, 进而可应用于孤立海相碳酸盐岩台地的沉积层序划分; 受限于复杂的白云岩化作用, Mg/Ca 难以反映海平面变化。 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  B/Ga、Zr/Al、Li、V 等指标表明, 早中新世初期三亚组水深逐渐加深, 有利于生物礁的发育; 中中新世早期梅山组二段海平面第 1 次达到最高值, 礁盘随之扩大, 形成较深水环境下的碳酸盐岩台地, 以潟湖相和内侧滩相为主; 随后水体于中中新世晚期梅山组一段逐渐变浅, 持续至晚中新世早期黄流组二段, 生物礁受淋滤剥蚀形成礁-滩相沉积; 晚中新世晚期黄流组一段海平面再次持续上升, 于上新世达到第 2 次最高值, 直至更新世水深才逐渐变浅。

**关键词:**西科 1 井; 微量元素; 常量元素; 海平面变化

中图分类号: P736.4; P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.199

## 0 引言

中国南海是西太平洋最大的边缘海, 在其演化历史中经历了多期强烈的构造事件。新生代中期南海在拉张过程中, 中央洋盆中的残余陆块逐步远离大陆, 形成了孤立高地, 如西沙群岛、中沙群岛及南沙群岛。加之其优越的地理位置(赤道与北纬约  $20^\circ$  之间)及适宜的海水温度, 自中新世以来南海便是全球碳酸盐岩台地生长发育的重要区域<sup>[1-4]</sup>。碳酸盐岩台地的生长繁衍对海平面升降十分敏感, 随着中央海盆扩张发生沉降并接受沉积, 记录了大量古盐度、古温度、古环境氧化还原状态和酸碱度等反映海水成分变化的地化参数, 因此在海平面变化研究中占有举足轻重的地位<sup>[5-12]</sup>。

沉积物中的常量及微量元素保存了非常丰富的

地质历史信息, 对沉积环境的记录具有精确的示踪性和较高的分辨率, 可用于地质作用的过程标定, 成为了研究地质构造事件、古环境演化及古气候变化的重要手段<sup>[13-14]</sup>。近年来, 许多学者利用微量元素及稳定同位素手段针对海平面变化进行的探索工作, 大都以陆源沉积地层为研究对象, 但西沙群岛作为远离大陆的孤立碳酸盐岩台地, 大部分为海相自生沉积, 几乎不受陆源碎屑矿物输入的影响, 因此元素地化手段的应用目前相对较少。在西沙地区完成的西石 1 井、西永 2 井和西琛 1 井, 钻井深度有限, 西永 1 井钻穿中新统, 但为岩屑钻进方式, 没有取心, 因此西沙地区一直没有获得完整的碳酸盐岩台地生长发育记录, 极大地限制了南海碳酸盐岩台地的研究<sup>[15-16]</sup>。中海石油(中国)有限公司湛江分公司在西沙群岛宜德环礁上的石岛上顺利完成了西科 1 井的钻探, 全井 1268.2 m, 目前为止取心最为完整, 为科学研究的开展提供了相当宝贵的资料(研究区位置如图 1 所示)。朱伟林等<sup>[17]</sup>通过岩心观察对西科 1 井生物礁地层进行了划分, 并归纳出礁体淹没型生长单元和暴露型生长单元的特征。王振峰等<sup>[18]</sup>通过岩石铸体薄片观察、阴

收稿日期: 2020-12-05

资助项目: “十三五”国家科技重大专项(2017ZX05026-005); 国家自然科学基金(41106064, 41872114)

作者简介: 刘新宇(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋石油勘探及地质方面的研究工作。E-mail: liuxy5@cnooc.com.cn

极发光及扫描电镜测试分析, 分析了西科 1 井白云岩化特征, 认为高频相对海平面波动, 蒸发环境以及热液活动是造成西沙台地白云岩化的关键原因。刘新宇等<sup>[19]</sup> 描述西科 1 井上新世有孔虫种属类别及沉积环境分布特征和中新世石珊瑚种属类别及珊瑚样式主要特征, 进一步的为沉积环境分析和地层年代划分提供了重要的依据。罗威等<sup>[20]</sup> 进行西科 1 井综合地层学研究, 综合分析西科 1 井地层界面的划分方案。SHAO 等<sup>[12, 21]</sup> 利用 BIT、Tex86 等

指标研究了西科 1 井海平面变化与碳酸盐岩台地的发育演化及控制因素。前人对西沙碳酸盐岩台地进行了大量研究, 为本文相关讨论奠定了坚实的基础。

本文旨在探讨西沙群岛地区碳酸盐岩台地中所含化学元素演化规律与海平面变化的响应关系, 以期深入了解早中新世以来南海北部的沉积演化特征, 并为今后孤立生物礁碳酸盐岩沉积物源及构造背景分析工作提供相对可靠的对比资料。

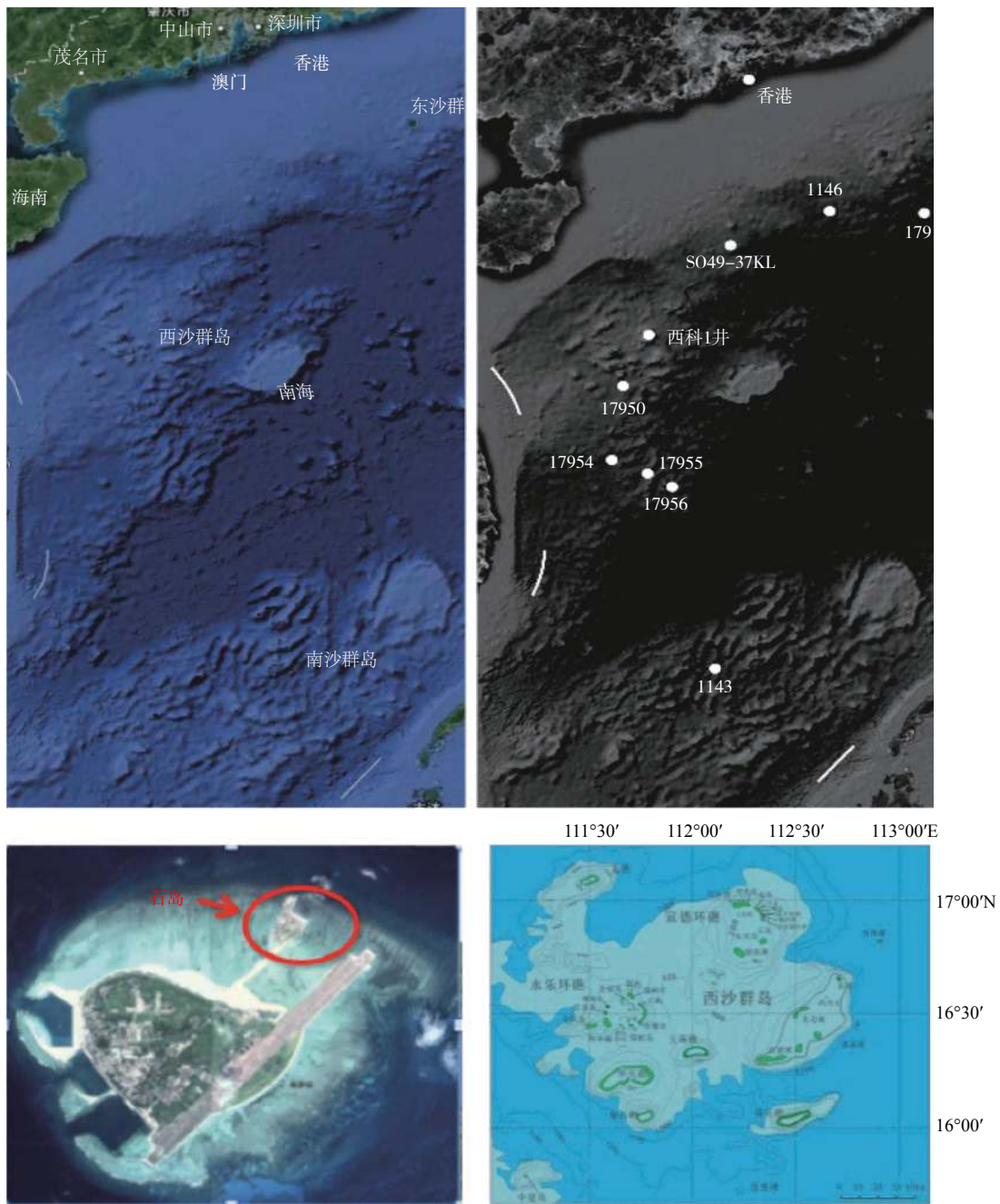


图 1 西沙群岛 (a)、西科 1 井及其他井位分布 (b) 及石岛 (c) 和西沙群岛各礁位置分布图 (d)

Fig.1 Location of Xisha Islands(a), well Xike 1 and the other wells(b), Shidao Island(c), and reefs on the Xisha Islands(d)

## 1 区域地质背景

西沙群岛位于西沙隆起之上(15°43′—17°07′N, 111°11′—112°54′E),是在孤立碳酸盐岩台地背景上发育起来的生物礁滩体系,岛屿总面积约8 km<sup>2</sup>,由永乐群岛和宣德群岛构成,是中国南海四大群岛中陆地总面积最大的群岛。渐新世时期,伴随新南海的扩张,西沙地块逐渐远离华南大陆<sup>[22]</sup>。到晚渐新世,新南海脊发生跃迁,西北次海盆不再扩张,西沙-中沙地块北部的断陷不再横向增长,此时,西沙地块停止迁移。至早中新世23 Ma,随着西南次海盆的打开,西沙地块随着岩石圈裂后热沉降逐渐下沉,西沙隆升区沉入海下,成为水下隆起高地。此时的西沙地块由于周围被负地形环绕,相邻大陆的河流输入等很难再到达,该水下高地为生物礁生长发育提供了适宜的地形地貌条件<sup>[23-25]</sup>。早中新世以来,该区广泛发育着大规模的生物礁滩体系<sup>[26-28]</sup>。

朱伟林等<sup>[17]</sup>、陈北辰<sup>[29]</sup>依据古暴露面特征、岩性相组合,生物类型以及地球化学元素测试等结果,将西科1井中新世以来地层划分为16个三级层序(图2)。由于西科1井位于隆起带的构造高部位,在低位时期处于暴露风化的状态并形成一定厚度的暴露层段以及下伏的溶蚀层段。因此,在西科1井生物礁层序地层中仅划分海进(TST)和高位(HST)2种体系域单元,每个体系域里面发育数目不等的准层序组,缺乏低位体系域(LST)。

全新一更新统乐东组深度为0~214.89 m,以生物礁沉积为主,发育3个三级层序Sq3—Sq1。Sq1深度为36.69~0 m,底部为礁核微相,生物礁灰岩大量发育。顶部21~0 m为弱固结-未固结的生物碎屑砂,局部见黑色有机质软泥,与现今生物礁的暴露有关。Sq2位于98.19~36.69 m,发育厚层的礁核微相,其岩性类型以生物礁灰岩与苔藓虫-红藻浮砾灰岩为主,上部则发育生物礁灰岩和绿藻-有孔虫灰岩。Sq3发育典型的生物礁灰岩,可观察到一定的溶蚀作用。珊瑚骨架保存较为完好,体腔内部不含充填物。中间夹生物碎屑灰岩,可见大量的珊瑚、棘皮、红藻等生物碎屑,这些生物颗粒的分选磨圆较差。

上新统莺歌海组深度为374.95~214.89 m,可划分出3个三级层序Sq6—Sq4,3个层序间发育生物礁云岩。三级层序单元Sq4深度为214.89~259.5 m,底部层段灰泥质含量高,沉积相组合以外

侧滩和局限潟湖相为主,占主导的岩性类型为生物碎屑灰岩,可见发育大量的底栖有孔虫、壳状红藻、苔藓虫,和少量的棘皮、浮游有孔虫。生物体腔保存较为完整,为水动力条件较弱环境下的沉积组合类型。三级层序单元Sq5深度为288.43~259.5 m,主要为生物碎屑灰岩,造礁生物主要为红藻,附礁生物主要为有孔虫、棘皮、双壳和腹足类。三级层序单元Sq6深度为374.95~288.43 m,沉积相组合以外侧滩和局限潟湖相为主,占主导的岩性相类型为生物碎屑灰岩,可见发育大量的底栖有孔虫、壳状红藻、苔藓虫,和少量的棘皮、浮游有孔虫。生物体腔保存较为完整,为水动力条件较弱环境下的沉积组合类型。总体来看,莺歌海组以生物碎屑灰岩为主,部分层段白云岩化作用显著。

上中新统黄流组深度为576.5~374.95 m,可以划分出2个三级层序Sq8和Sq7,以470.1 m为界,Sq7深度为374.95~470.1 m,以生物碎屑灰岩、生物碎屑云岩与生物礁云岩互层为特征,可见发育大量的底栖有孔虫、壳状红藻、苔藓虫,和少量的棘皮、浮游有孔虫,顶部为黄褐色风化层。Sq8深度为470.1~576.5 m,展现了与Sq7完全不同的沉积相,以泥晶白云岩及生物礁云岩为特征,藻云岩发育,可见珊瑚和双壳类碎屑,固结好,轻度破碎,具强白云岩化作用。总的来说,上中新统黄流组受白云岩化作用的影响显著,以大套的白云岩地层夹杂着少量灰岩层段为特征。

中中新统梅山组地层深度为1032.46~576.5 m,分为2段。梅山组一段介于758.4~576.5 m,以633.85 m为界,划分出三级层序Sq10和Sq9。Sq9以内侧滩微相为主,以生物碎屑灰岩为特征,发育较多底栖有孔虫、红藻、双壳等生物碎屑,生屑颗粒的磨圆分选较差,局部可见生物铸模孔及粒间溶蚀孔,顶部为溶蚀角砾岩。Sq10以潟湖相为主,广泛发育生物碎屑灰岩,可见大量的红藻颗粒、棘皮、腹足、有孔虫、双壳等生物,其生物结构保存较为完整。梅山组二段深度为1032.46~758.4 m,其中可以识别出3个三级层序单元: Sq13—Sq11。Sq11主要沉积相类型为内侧滩微相/潟湖相,以生物碎屑灰岩为特征,发育大型底栖有孔虫、红藻颗粒,以及少量的绿藻、腹足、双壳、浮游有孔虫。顶部发育厚层白云岩礁盖,其白云岩化作用强烈。Sq12主要为外侧滩微相,以生物碎屑灰岩为特征,其生物组成类型较为单一,以颗粒状红藻和壳状红藻为主。中部发育内侧滩微相,可见大量的底栖有孔虫、红藻

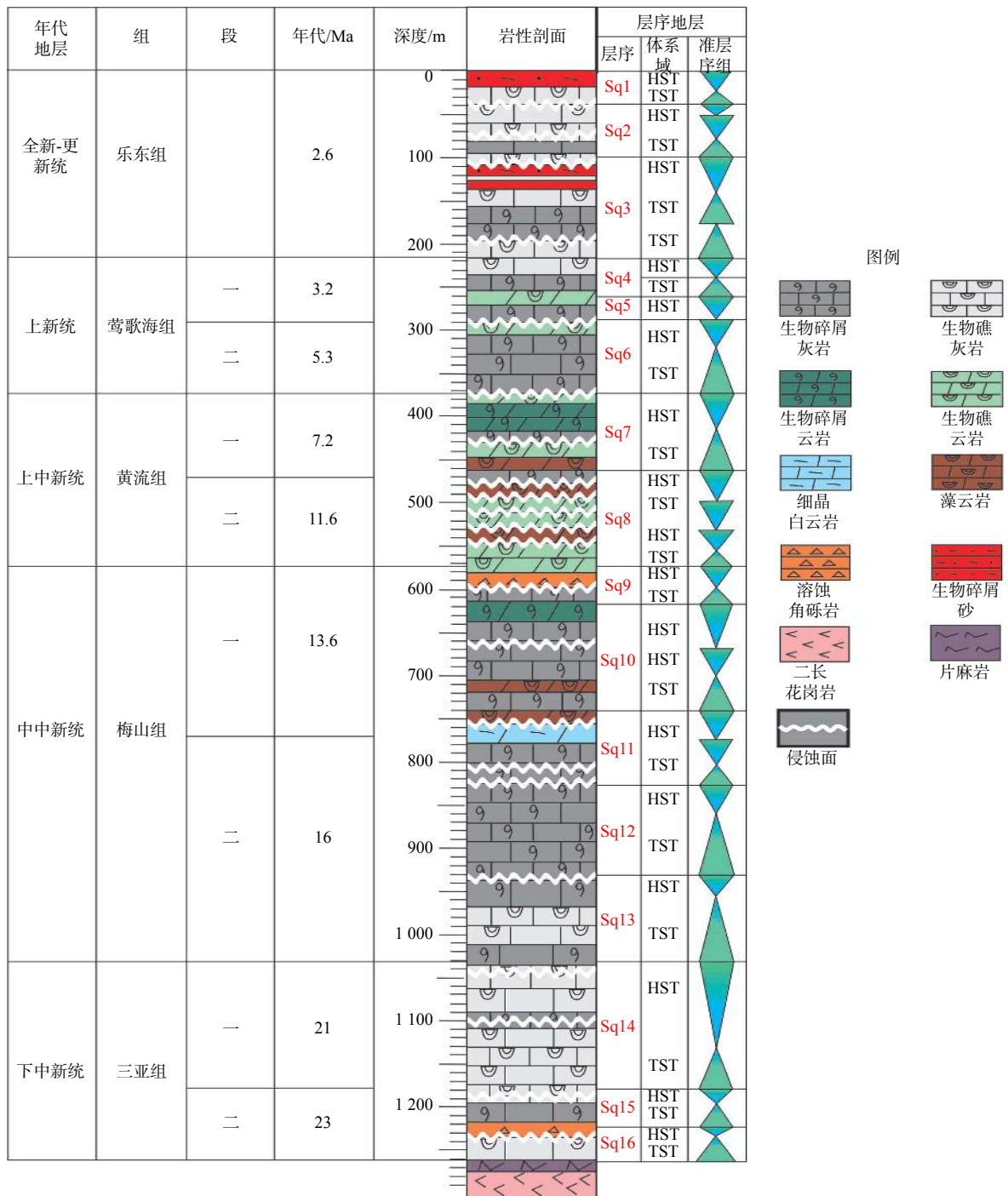


图 2 西科 1 井层序地层分析柱状图<sup>[29-30]</sup>

Fig.2 A column of sequence stratigraphy analysis of well Xike 1<sup>[29-30]</sup>

颗粒, 含有较多的棘皮、双壳、珊瑚碎屑等颗粒。Sq13 发育大量的底栖有孔虫, 含有较多的颗粒红藻、壳状红藻以及少量的棘皮、腹足等生物碎屑颗粒。整个中中新统地层中, 珊瑚含量稀少, 沉积相类型以内侧滩与外侧滩微相为主, 夹杂少量潟湖相沉积。

下中新统三亚组深度为 1 257.52~1 032.46 m, 其中可以识别出 3 个三级层序 Sq16、Sq15、Sq14。

Sq14 位于 1 179.69~1 032.46 m, 沉积相整体以生物礁灰岩相为主, 期间夹杂着小型的暴露面, 局部甚至发生土壤化的现象, 指示了相对浅水的环境。Sq15 位于 1 224.5~1 179.69 m, 以发育一套富含大型底栖有孔虫、壳状/颗粒状红藻的生物碎屑灰岩为特征, 在矿物测试中可见夹杂着薄层白云岩的内侧滩微相。Sq16 位于 1 257.52~1 224.5 m, 底部层段中含有大量的石英质陆源碎屑颗粒, 表现为碳酸

盐岩-陆源碎屑混合沉积。向上,陆源沉积物含量逐渐减少,造礁生物大量发育,可见珊瑚碎片、底栖有孔虫、红藻颗粒、绿藻等生物碎屑颗粒大量发育,且骨骼结构保存良好,顶部可见溶蚀角砾岩层,该层序为生物礁滩体系演化的初始阶段。

## 2 材料和方法

本文分析样品总计 1 281 个,采样深度达 1 267.8 m,表层 300 m 以上以 0.2~0.4 m 设定采样间距;300 m 以下 0.6~1 m 设定采样间距,同时注意在明显不整合分界面处适当加大采样密度。

我们对全岩心进行了主微量元素测试,具体处理过程如下:首先将碳酸盐岩样品置于低温-50℃下烘干、研磨,并在 600℃环境中灼烧 2 h(为防止样品二次受潮最好于灼烧结束后保温适当时间再取出)以去除有机质及层间水。称取样品 30~45 mg 于溶样器中并依次加入 2 mL 1:1HNO<sub>3</sub> 和 2 mL 纯 HF,经超声震荡 1 h 后在 180℃的加热板上保温 24 h。样品蒸干后再依次加入 2 mL 1:1HNO<sub>3</sub> 和纯 HF,中间间隔 5 min。于加热板保温 7 d 期间,每天至少保证 30 min 的超声震荡处理。保温完毕并蒸干样品,加入 4 mL 1:1HNO<sub>3</sub> 溶液,超声 30 min 后在 180℃加热板上完成保温。将样品置于 2% 的 HNO<sub>3</sub> 溶液中稀释至 1 000 倍后,分别用 ICP-AES 检测常量元素,ICP-MS 检测微量元素,在测定过程中全程加入 1 μg/L 的 Ru 作为内标对仪器稳定性进行监测,每个样品测定 6 次,并由国际标样(AGV-2、BCR-2、BHVO-2 和 GBW07120)、重复样品以及空白样品进行校正,样品准确度及精确度由控制样品及重复样品监控,所有样品的相对偏差控制在±2%。处理及测试分析工作均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。

## 3 结果与讨论

不同体系域是海平面上升与下降交替旋回过程中不同阶段的产物,其物质组成主要受控于海平面升降转换。在一个完整的海平面升降旋回的不同阶段,海水的化学成分也随之产生相应的变化,因此,在不同的海平面升降阶段,海相沉积层中的地球化学元素组成也会对应产生明显的差异。反之,这些沉积层序中地球化学元素组成表现出来的差异则可以反映海平面升降的不同阶段<sup>[31-33]</sup>。

### 3.1 常量元素分布特征

地史演化过程中,地球化学元素及相关组合在含量上常常表现出一定的规律性、方向性和阶段性,并且与重大地质历史时代的分界线通常相互吻合。每一沉积体系域是在特定的地质历史时期和特定的海平面升降变化阶段中形成的特定沉积产物,因此,利用常量元素及相关比值来分析海平面变化是可行的<sup>[31,34]</sup>。

P 是典型的非金属元素,在地壳的平均质量分数为 0.01%,但在某些海洋沉积物或沉积岩中的质量分数却可以达到较高水平<sup>[35]</sup>。P 进入海洋的途径主要以风化作用产物经河流搬运,被海洋生物吸收并富集在体内。待生物体死亡后,通过沉降作用聚集在海底。之后 P 随上升流到达海水表层,促进生产力的繁盛,作为重要的营养盐成为海洋生物食物链的基础<sup>[35-40]</sup>。西科 1 井位于孤立的碳酸盐岩台地上,距离大陆海岸线较远,因此受陆源碎屑物质影响较小,西科 1 井中 P 的增加主要是富含营养的上升流提供的。当相对海平面较高时,上升流增强,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量上升;反之,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量下降。在早中新世期间,三亚组二段受大量陆源碎屑颗粒影响,元素波动较大。其上三亚组一段至中中新统梅山组二段,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量一直保持在较高水平,反映海平面一直处于相对较高的水平,强烈的上升流携带丰富营养盐物质上涌,造成了造礁生物如珊瑚虫、藻类、苔藓虫等海洋生物的勃发,这与该时碳酸盐岩台地的生长发育相吻合。该时期由于南海扩张作用的进行,海平面持续上升,生物礁盘扩大。中中新统梅山组一段至上中新统黄流组二段,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 整体处于较低水平,反映海平面降低,上升流带来的营养物质减少;同时生物礁暴露地表,受大气淡水环境影响,沉积物中磷酸盐及有机质流失,使得礁盘持续萎缩,沉积环境以礁-滩相砂互层为主,与该时期生物礁发育滞缓并广受淋滤剥蚀相吻合。之后上中新统黄流组一段至上中新统莺歌海组,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量再次升高,反映相对海平面的升高,至更新统乐东组 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量出现下降趋势,反映相对海平面的降低,这与南海海平面变化是一致的,也与前人研究的西沙地区海平面变化结果吻合<sup>[12,30]</sup>。由此可见,在离大陆较远的孤立碳酸盐岩台地上,P 元素含量受海水深度升降影响明显,可作为反映海平面变化的灵敏指示剂(图 3)。

不仅单个元素含量变化可以包含相当丰富的

地质信息, 某些元素之间还能够以比值的形式更好的反映古环境及古气候变迁。Na 元素在水体中具有较高的溶解度, 可以指示海相环境。K 元素离子半径较大, 极化率较高, 容易被土壤吸附, 因此通常情况下, 陆相环境中 K 含量略高, 海相环境中 K 含量略低; Si 元素主要富集于硅酸盐中, 在海相环境中含量略低<sup>[41]</sup>。因此, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 值和 Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> 的增加一般预示着沉积环境向更深、能量更低的方向变化, 反之沉积环境向水体更浅的环境变化。西科 1 井中的 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> 比值呈现出规律性的变化特点, 分析曲线可知, 三亚组一段至梅山组二段及黄流组一段至莺歌海组阶段, 这 2 项参数均明显的表现为增长趋势, 因此可以推断出此时海平面上升, 沉积环境更深, 溶解 Na 含量相对增高, 产生曲线上的峰值。反之, 梅山组一段至黄流组二段及乐东组阶段, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> 比值均相对较低, 反映水体深度较浅, 相对海平面下降, 在岩心上也出现多期暴露现象, 这 2 段海平面降低可能分别受控于南极冰盖和北极冰盖的形成。由此可见, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> 比值也可以作为反映海水深浅变化的有效指示参数(图 3)。

从元素变化曲线上来看, Mg/Ca 值在梅山组一段顶部及黄流组出现较明显的异常值, 特别是 376~570 m 井段 MgO 表现出剧烈的增长。该现象

反映了强烈的白云岩化作用, 即碳酸质灰岩向白云岩及白云质灰岩转变, 结合岩性分析我们可以在西科 1 井部分井段中找到相应证据<sup>[21]</sup>(图 4)。白云岩化现象主要由于海平面频繁动荡, 导致沉积物出现多期暴露面, 因强烈蒸发作用所致<sup>[30, 42]</sup>。梅山组一段顶部及黄流组, Mg/Ca 比值较高, 同时在 470 m 与 430 m 可见风化晕、淋滤面及溶洞的, 这也为较强的白云岩化作用提供相关证据。但 Mg/Ca 比值大小并不绝对反映水体深浅, 本研究以及前人的研究成果均证明黄流组一段海平面上升, 水体较深, 但仍广泛发育白云岩, 这显然与白云岩化作用复杂的机理相关, 并不能反映水体深浅。同样的, 960~1180 m 井段对应早中新世至中中新世早期, Mg/Ca 值较高, 大量溶洞发育, 对应白云岩化作用, 但岩性分析以及元素指标均表明该阶段为水深不断加深的礁相-潟湖相沉积环境, 海平面整体呈现上升趋势, 生物礁礁盘发育并扩大。由此说明, Mg/Ca 比值在一定程度上反映了白云岩化事件, 但限于白云岩化作用复杂的机理, Mg/Ca 值大小并不绝对反映海平面变化, 需结合岩性特征具体分析其沉积环境(图 3)。

值得指出的是, 无论单个元素还是元素之间的比值, 在接近井底部的三亚组二段(1180 m 之下)均不同程度上出现了异常的较高值, 可能是因为西

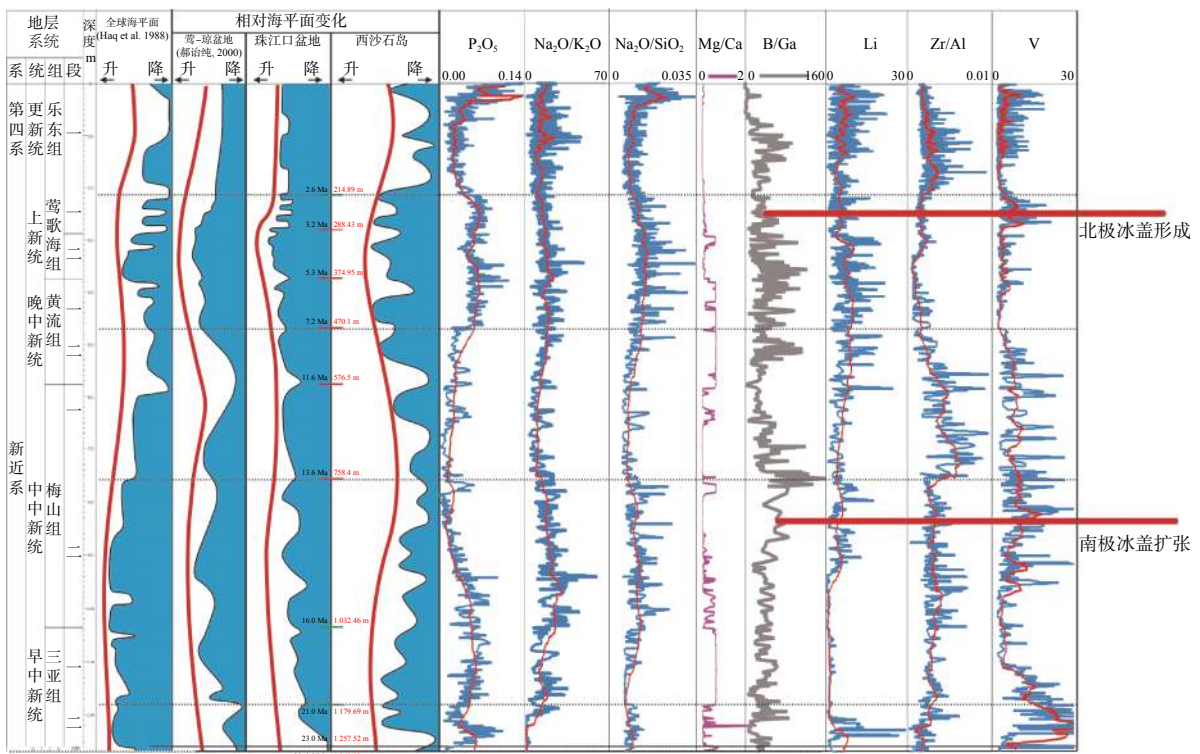
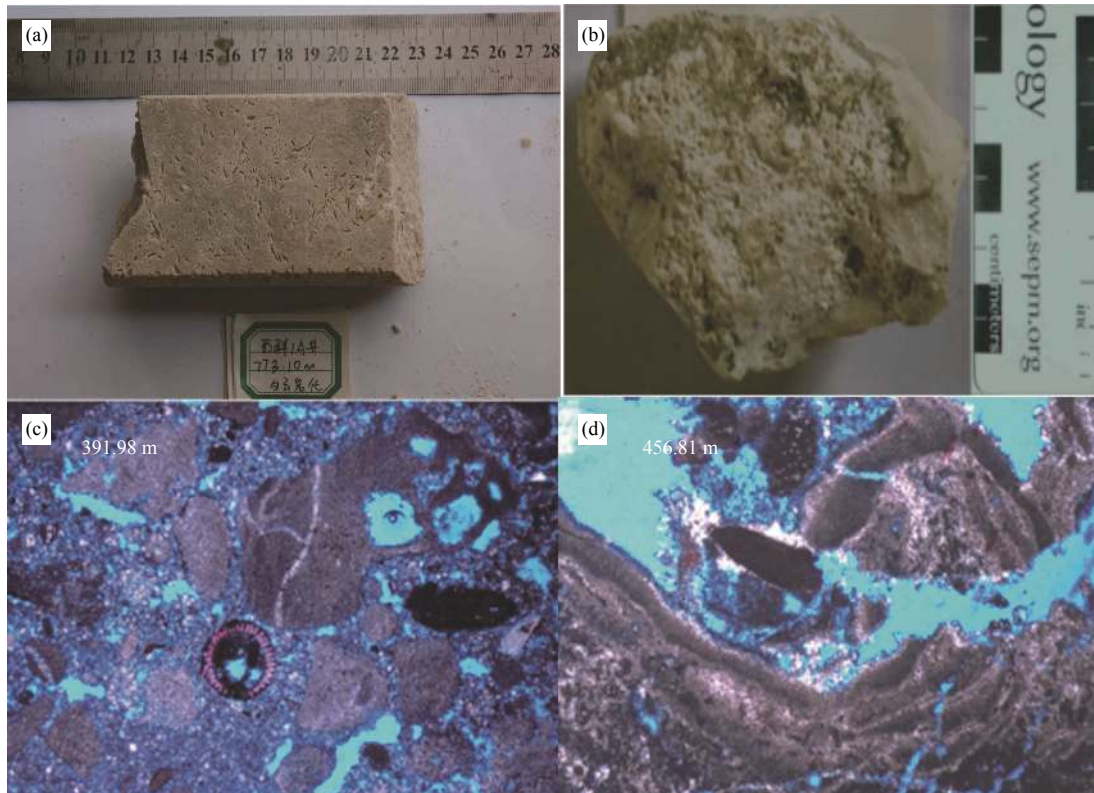


图 3 西科 1 井常量及微量元素变化示意图

Fig.3 Distribution of major elements and trace elements in well Xike 1



(a)生物礁云岩, 773.10 m; (b)礁云岩被藻纹层包裹, 390.30 m; (c)白云岩化现象, 391.98 m; (d)白云岩化现象, 456.81 m

图4 西科1井典型白云岩收标本及镜下照片

Fig.4 Pictures of classic dolomites specimens and petrographic thin sections of well Xike 1

科1井底部沉积物与基底发生浸染作用,元素含量产生较大的浮动。在第四系顶部0~21 m,部分元素及元素比值出现了异常的较高值,可能因过于接近地表,现代生物活动产生的异常值。因此,在分析元素与海平面变化之间的响应关系时,西科1井最低部以及最顶部这2部分均不参与讨论。

### 3.2 微量元素分布特征

地壳中微量元素的分布与其形成、演化过程中的环境密切,其中许多微量元素的赋存状态也不受后期成岩作用的影响。因此,一些微量元素的含量高低及相关元素之间的比值大小是判别沉积环境沉积相的良好指示剂。在海水沉积环境中,沉积相的变化通常与海平面变化联系密切,因此,可以通过相关微量元素含量变化及相关比值来间接推断出海平面的升降过程<sup>[43-44]</sup>。

Li元素在流体相中有很高的溶解度,它不是大气或生物过程中的重要组成部分<sup>[45]</sup>。一般来说,岩石暴露于大气环境中,Li经风化作用非常容易被淋滤至风化面以下,使得风化面下的沉积物中Li大量富集,即在海水较浅,时常暴露的环境中Li含量较高,在水深较深的环境中Li含量较低。经研究分析,

西科1井中Li含量呈现出随海平面变化而变化的规律。三亚组一段-梅山组二段中下部,Li的含量很低,表明此时海平面处于上升期间,水体环境较深,Li受淋滤作用影响小。而在梅山组一段到黄流组二段,Li含量呈现稳步上升的趋势,反映该时期水深较浅,多期短暂暴露面产生,淋滤作用增强导致Li元素富集。到黄流组一段至莺歌海组,Li含量呈现低值,反映海水深度再次增加,我们推测可能受控于全球海平面发生动荡变化。更新统乐东组阶段Li才表现为略微的上升趋势,反映海平面再次下降。由此可见,Li可以作为一种可以反映海水深度的微量元素参数,其含量与相对海平面之间呈现负相关关系(图3)。

B元素大多富集于硼酸盐中,硼酸盐在水中的溶解度较大,迁移能力较强,海相泥质沉积物中含量较高。而Ga元素较不活跃,易于沉淀,大多富集与淡水沉积物中,许多研究者常利用B/Ga指示古盐度的变化,进而间接指示海平面变化<sup>[6]</sup>,B/Ga增大,通常反映水体盐度较高,反映水深较深的环境;反之,水体盐度较低,反映水体较浅的大气淋滤环境。研究曲线可知,三亚组一段到梅山组二段以及黄流组一段至莺歌海组,该比值表现上升趋势,反

映 B 含量相对增长较快, 溶解的 B 元素含量增加, 古盐度较高, 推断出因海进导致水体深度增加。而梅山组一段到黄流组二段及乐东组阶段, 该比值呈现下降状态, 反映古盐度较低, 推断出因海退导致水体深度降低的变化趋势(图 3)。

Zr 元素是较为典型的亲陆元素, 通常存在于滨浅海沉积区域, 主要以锆石等稳定的矿物形式存在, 密度一般较大, 不易随黏土等细粒物质长距离搬运。虽然西科 1 井位于孤立碳酸盐岩台地, 远离大陆鲜有陆源物质输入, 但 Zr 作为一种陆源代表可以一定程度上反映水体较浅的沉积环境。同时研究发现, Al 元素含量随着水深增加而显著增加<sup>[46]</sup>, 因此可以将 Al 作为一种海源代表<sup>[47]</sup>。因此 Zr/Al 的比值增大, 水体变浅; 反之, 水体深度更深。该比值的变化曲线也呈现出规律性的变化: 三亚组一段到梅山组二段以及黄流组一段至莺歌海组, Zr 含量相对 Al 增长较慢, Zr/Al 整体表现低值, 表示该时期水体较深, 与该时期海平面较高相吻合; 梅山组一段到黄流组二段及乐东组阶段, Zr 含量相对 Al 增长较快, Zr/Al 整体表现高值, 表示该时期水体较浅, 与该时期海平面较低相吻合。因此, Zr/Al 元素比值的变化可以一定程度上反映海平面变化(图 3)。

微量元素的赋存状态及对应沉积物的富集程度受控于沉积环境的氧化-还原状态, 如 V 元素, 且沉积后的重新氧化作用对其含量不产生影响, 因此可通过对氧化还原环境敏感的微量元素含量, 来重建沉积环境沉积相, 进而研究其与海平面变化的响应关系。氧化环境下, 黏土矿物对 V 有吸附作用, 因此在泥岩、黏土岩中含量最高, 可将其作为一种陆源指示参数<sup>[48]</sup>, V 元素增大, 代表较氧化的沉积环境, 水体深度相对较浅; 反之, V 元素减小, 代表较还原的沉积环境, 水体深度相对较深。从元素变化曲线来看, 三亚组一段到梅山组二段 V 含量呈现低值, 水体中的 V 沉淀析出, 反映此时沉积环境以较深水的还原环境为主导, 海平面为上升趋势。梅山组一段到黄流组二段, V 含量相对增高, 反映此时出现大范围的大气暴露氧化环境, 水体深度变浅。黄流组一段到莺歌海组, V 急剧降低, 保持在较低的水平, 反映此时水体深度较深; 到乐东组, V 含量有所增高, 反映较浅的水体环境。

## 4 结论

(1) 元素地球化学方法主要是通过分析常量及

微量元素含量, 及相关元素之间比值的变化规律, 进行古水深、古盐度、古环境氧化还原状态及沉积环境的判别和重建, 从而为恢复古海洋海平面升降旋回变化过程提供良好基础。

(2) 典型的常量元素如 P、K、Na、Si、Al 及相关比值表现出与海平面变化较好的响应关系, 元素的重大转折点与海平面升降分界线和全球重大构造事件相吻合, 可作为辅助分析海平面变化的良好指示剂。典型的微量元素如 Li、B、Ga、Zr、V 及相关比值也能很好的反映海平面变化。但 Ca、Mg 元素因机理复杂的白云岩化作用难以反映海平面变化, 说明在应用地球化学指标进行海平面升降旋回分析时, 还应配合古生物学、沉积学、岩性学综合考虑, 以便获得更为精确的结论。鉴于西科 1 井的特殊地理位置, 即孤立的西沙群岛石岛碳酸盐岩台地, 这些元素的良好应用为今后研究该类地层及相应沉积环境提供了很好的参考资料。

(3) 西科 1 井元素地球化学特征显示, 早中新世三亚组水深逐渐加深, 有利于生物礁的发育; 中中新世梅山组二段海平面第 1 次达到最高值, 礁盘随之扩大, 形成较深水环境下的碳酸盐岩台地, 以潟湖相和内侧滩相为主; 随后水体逐渐变浅, 中中新世梅山组一段到晚中新世黄流组二段处于低值, 同时生物礁受淋滤剥蚀形成礁-滩相沉积; 晚中新世黄流组一段到上新世莺歌海组海平面再次持续上升; 更新世乐东组, 水深逐渐变浅。

### 参考文献:

- [1] 王律江, 卞云华, 汪品先. 南海北部末次冰消期及快速气候回返事件[J]. 第四纪研究, 1994, 14(1): 1-12.
- [2] 何起祥, 张明书. 中国西沙礁相地质[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [3] 吕炳全, 王国忠, 全松青, 等. 试论西沙群岛石岛的形成[J]. 地质科学, 1986(1): 82-89, 102.
- [4] 张明书. 西沙生物礁碳酸盐沉积地质学研究[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 9-12.
- [5] 钱凯, 王素民, 刘淑范, 等. 东营凹陷早第三纪湖水盐度的计算[J]. 石油学报, 1982(4): 95-102.
- [6] 李进龙, 陈东敬. 古盐度定量研究方法综述[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(5): 1-3, 5.
- [7] 文华国, 郑荣才, 唐飞, 等. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析[J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 114-120.
- [8] 赵焕庭, 张乔民, 宋朝景, 等. 华南海岸和南海诸岛地貌与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [9] 汪品先. 南海: 我国深海研究的突破口[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(3): 1-4.
- [10] 马玉波, 吴时国, 谷明峰, 等. 西沙海区碳酸盐台地地震反射



- 特征及沉积模式[J]. 海洋学报, 2010, 32(4): 118-128.
- [11] 朱爱美, 石学法, 邹建军, 等. 88ka以来冲绳海槽北部古环境演化: 来自元素地球化学的证据[J]. 海洋学报, 2015, 37(6): 58-69.
- [12] SHAO L, CUI Y C, QIAO P J, et al. Sea-level changes and carbonate platform evolution of the Xisha Islands (South China Sea) since the Early Miocene[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 485: 504-516.
- [13] 许中杰, 程日辉, 王嘹亮, 等. 广东惠来地区早-中侏罗世桥源组海平面相对升降及构造背景的元素地球化学证据[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(4): 966-975, 982.
- [14] 许中杰, 程日辉, 张莉, 等. 华南陆缘晚三叠-早、中侏罗世海平面相对升降与古气候演化的地球化学记录[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2012, 37(1): 113-124.
- [15] 赵强. 西沙群岛海域生物礁碳酸盐岩沉积学研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010.
- [16] 魏喜. 西沙海域晚新生代礁相碳酸盐岩形成条件及油气勘探前景[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- [17] 朱伟林, 王振峰, 米立军, 等. 南海西沙西科1井层序地层格架与礁生长单元特征[J]. 地球科学, 2015, 24(4): 677-687.
- [18] 王振峰, 时志强, 张道军, 等. 西沙群岛西科1井中新统一上新统白云岩微观特征及成因[J]. 地球科学, 2015, 40(4): 633-644.
- [19] 刘新宇, 祝幼华, 欧阳杰, 等. 南海西沙群岛西科1井上新世有孔虫及沉积环境研究[J]. 微体古生物学报, 2019, 36(3): 288-297.
- [20] 罗威, 张道军, 刘新宇. 西沙地区西科1井综合地层学研究[J]. 地层学杂志, 2018, 42(4): 485-498.
- [21] SHAO L, LI Q Y, ZHU W L, et al. Neogene Carbonate platform development in the NW South China Sea: Litho-, bio- and chemo-stratigraphic evidence[J]. *Marine Geology*, 2017, 385: 233-243.
- [22] 金庆焕. 南海地质与油气资源[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 199-206.
- [23] 龚再升, 王国纯. 中国近海油气资源潜力新认识[J]. 中国海上油气, 1997, 11(1): 1-12.
- [24] FOURNIER F, BORGOMANO J, MONTAGGIONI L F. Development patterns and controlling factors of Tertiary carbonate buildups: Insights from high-resolution 3D seismic and well data in the Malampaya gas field (offshore Palawan, Philippines)[J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 175(1): 189-215.
- [25] 吴时国, 袁圣强, 董冬冬, 等. 南海北部深水区中新世生物礁发育特征[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(2): 117-121.
- [26] 吕修祥, 金之钧. 碳酸盐岩油气田分布规律[J]. *石油学报*, 2000, 21(3): 8-12.
- [27] 李颖虹, 黄小平, 岳维忠, 等. 西沙永兴岛珊瑚礁与礁坪生物生态学研究[J]. *海洋与湖沼*, 2004, 35(2): 176-182.
- [28] 吕彩丽, 姚永坚, 吴时国, 等. 南沙海区万安盆地中新世碳酸盐台地的地震响应与沉积特征[J]. 地球科学, 2011, 36(5): 931-938.
- [29] 陈北辰. 南海生物礁滩体系发育演化及其南北陆缘差异[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2020.
- [30] 鲁毅, 崔宇驰, 刘新宇, 等. 中国南海西沙碳酸盐岩台地形成过程及控制因素: 来自西科1井的地球化学证据[J]. 古地理学报, 2020, 22(6): 181-192.
- [31] 余焯, 张昌民, 李少华, 等. 元素地球化学在层序识别中的应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S1): 204-211.
- [32] 罗顺社, 汪凯明. 元素地球化学特征在识别碳酸盐岩层序界面中的应用: 以冀北拗陷中元古界高于庄组为例[J]. *中国地质*, 2010, 37(2): 430-437.
- [33] 高志前, 樊太亮, 李岩, 等. 塔里木盆地寒武-奥陶纪海平面升降变化规律研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(4): 549-556.
- [34] 鲍志东, 朱井泉, 江茂生, 等. 海平面升降中的元素地球化学响应: 以塔中地区奥陶纪为例[J]. 沉积学报, 1998(4): 32-36.
- [35] 沈俊, 施张燕, 冯庆来. 古海洋生产力地球化学指标的研究[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(2): 69-77.
- [36] 宋金明, 李学刚, 邵君波, 等. 南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为[J]. *海洋与湖沼*, 2006(4): 370-376.
- [37] 李小洁. 南海北部沉积物记录的早更新世气候变化[D]. 西安: 中国科学院研究生院(地球环境研究所), 2015.
- [38] KINSEY D W, DAVIES P J. Effects of elevated nitrogen and phosphorus on coral reef growth[J]. *Limnology and Oceanography*, 1979, 24(5): 935-940.
- [39] BERTRAND P, PEDERSEN T F, MARTINEZ P, et al. Sea level impact on nutrient cycling in coastal upwelling areas during deglaciation: Evidence from nitrogen isotopes[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(1): 341-355.
- [40] SALTZMAN M R. Phosphorus, nitrogen, and the redox evolution of the Paleozoic oceans[J]. *Geology*, 2005, 33(7): 573-576.
- [41] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1979(2): 51-60.
- [42] 杨扬. 白云岩地球化学特征与古气候和海侵事件的关系[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [43] 张国仁. 利用沉积地球化学特征分析古环境及海平面变化: 以鲁西东部中下寒武统为例[J]. 辽宁地质, 1997(1): 9, 11-14.
- [44] 徐立恒, 陈践发, 赵健. 普光气藏长兴-飞仙关组微量元素及海平面变化分析[J]. *天然气勘探与开发*, 2011, 34(4): 17-21, 97.
- [45] 汪齐连, 赵志琦, 刘丛强. 锂同位素在环境地球化学研究中的新进展[J]. *矿物学报*, 2006, 26(2): 196-202.
- [46] 高志友. 南海表层沉积物地球化学特征及物源指示[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
- [47] 崔秉荃, 卢武长, 杨绍全. 上扬子石炭纪锶同位素和微量元素铝与海平面变化的关系[J]. 成都地质学院学报, 1993(3): 33-38.
- [48] 汪凯明, 罗顺社. 海相碳酸盐岩锶同位素及微量元素特征与海平面变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 51-58.

## ELEMENT GEOCHEMISTRY OF WELL XIKE 1 ON THE XISHA ISLANDS AND ITS BEARING ON SEA LEVEL FLUCTUATION

LIU Xinyu<sup>1,2</sup>, SHAO Lei<sup>3</sup>, SHI Defeng<sup>1,2</sup>, SHI Wenfang<sup>2</sup>, OUYANG Jie<sup>1,2</sup>

(1 Hainan Energy Co. Ltd. of CNOOC, Haikou 570100, China; 2 Zhanjiang Branch of CNOOC(China) Ltd., Zhanjiang 524057, China;

3 School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This study focused on major and trace element geochemistry of the carbonate platforms of the Xisha Islands, northern South China Sea (SCS), based on the sedimentary characteristics of the succession since early-Miocene. A total of 1268 carbonate samples are collected and analyzed by ICP-MS. Both the major elements of  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , and the trace elements of B/Ga, Zr/Al, Li, V show perfect consistence with petrographic, stratigraphic and paleontological variations caused by the changes in paleo-salinity, Eh, pH and sea level fluctuation, which can be well applied for the study of depositional sequences of the isolated carbonate platforms. However, Mg/Ca are hard to be used as a proxy to reveal sea level changes, owing to the strong dolomitization.  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  B/Ga, Zr/Al, Li, V suggest that the bioherms started blooming with the sea water invasion since early-Miocene. During early middle-Miocene, bioherms with lagoonal and beach facies were well formed when the sea level reached its first peak. Then the sea level dropped in late middle-Miocene and early late-Miocene. In the late middle-Miocene, bioherms were strongly leached and eroded, as dominated by reef-beach facies. The sea level started to rise again during late late-Miocene and got to its second peak in Pliocene and then dropped for the second time during Pleistocene period.

**Key words:** well Xike 1; trace elements; major elements; sea level fluctuation