

doi:10.3799/dqkx.2015.074

西沙地区碳酸盐台地发育过程与海平面变化： 基于西科1井 *BIT* 指标分析数据

王振峰¹, 崔宇驰², 邵磊^{2*}, 张道军¹, 董茜茜², 刘新宇¹, 张传伦², 尤丽¹, 肖安涛¹

1. 中海石油有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

2. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 为了探讨南海碳酸盐台地的发育过程及控制因素, 采用有机分子化合物指标方法对其进行了研究. 有机分子化合物指标 *BIT* (branched isoprenoid tetraether) 是沉积物中源自陆源的细菌膜脂支链甘油双烷基甘油四醚 (branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers, 简称 bGDGTs) 与主要来自海洋古菌中的类异戊二烯 GDGTs (isoprenoid GDGTs, 简称 iGDGTs) 的含量之比, 在古环境研究中, 用来区分沉积物有机质的来源、判断沉积环境. 通过对西科1井的数据研究发现, 西科1井 *BIT* 指数随深度呈现三段式规律性变化, 从下到上呈现高一低一高的变化, 反映了中中新世以来南海海平面变化及碳酸盐台地生长发育的过程; 在中中新世晚期, 受全球及区域海平面变化下降影响, 西沙地区碳酸盐台地形成礁—滩交互的沉积地层, 由于大气淡水的影响, 造成 *BIT* 指数呈现高值; 到晚中新世至上新世, 全球及区域海平面出现持续上升, 有利于西沙碳酸盐台地的生长发育, 使该井沉积环境以礁内泻湖相为主, 造成 *BIT* 指数呈现低值; 在第四纪冰期, 全球及区域海平面出现总体下降趋势, 西沙碳酸盐台地又频繁暴露于地表, 造成 *BIT* 指数又呈现高值. 研究表明, 西沙地区碳酸盐台地受区域相对海平面变化影响更大, 说明南海海平面变化既受全球海平面变化的影响, 也受南海区域构造沉降的控制.

关键词: 南海; 西沙群岛; 西科1井; 生物礁; 有机化合物; 海洋地质; 地层学.

中图分类号: P67

文章编号: 1000-2383(2015)04-0900-09

收稿日期: 2014-10-25

Carbonate Platform Development and Sea-Level Variations of Xisha Islands: Based on *BIT* Index of Well Xike-1

Wang Zhenfeng¹, Cui Yuchi², Shao Lei^{2*}, Zhang Daojun¹, Dong Xixi²,
Liu Xinyu¹, Zhang Chuanlun², You Li¹, Xiao Antao¹

1. China National Offshore Oil Corporation Limited-Zhanjiang, Zhanjiang 524057, China

2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: In order to explore the developmental process of carbonate platform in the South China Sea (SCS) and its control factors, the organic molecular compound index method were described in this study. The branched isoprenoid tetraether (*BIT*) index is the ratio between the branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers (bGDGTs) from terrigenous supply and isoprenoid GDGTs (iGDGTs) from marine crenarchaeol comprising the majority of denominator, which serves as a proxy for provenance discrimination of the organic matter and related sedimentary environments in paleoenvironmental research. The *BIT* curve of well Xike-1 is characterized by a unique “high-low-high” feature up section, indicating the effects of sea-level variations and carbonate platform development since Middle Miocene in the SCS. Strata with reef-beach facies were developed within carbonate platforms of Xisha Islands influenced by decrease in global as well as regional sea-level during the Late Miocene, with increased *BIT* values due to plenty of precipitation. Between Late Miocene and Pliocene when sea-level was higher, carbonate platforms

基金项目: 中国海洋石油总公司项目 (No.CNOOC-2013-ZJ-01); 国家科技重大专项项目 (No.2011ZX05025-002); 国家自然科学基金项目 (No.91128207).

作者简介: 王振峰 (1956—), 男, 教授级高工, 主要从事综合层序地层学和石油地质学的研究. E-mail: wangzhf@cnooc.com.cn

* **通讯作者:** 邵磊, E-mail: lshao@tongji.edu.cn

引用格式: 王振峰, 崔宇驰, 邵磊, 等. 2015. 西沙地区碳酸盐台地发育过程与海平面变化: 基于西科1井 *BIT* 指标分析数据. 地球科学——中国地质大学学报, 40(5): 900-908.

were better formed in shallow marine environment with low *BIT* values. Carbonate platforms of Xisha Islands were periodically exposed in Quaternary as a result of sea-level decline over glacial cycles, leading to the second increase in *BIT*. Our results demonstrate that carbonate platforms of Xisha Islands have been affected by regional sea-level variations, reflecting a coupling effect on the SCS by global sea-level fluctuations and regional tectonic subductions.

Key words: South China Sea; Xisha Islands; well Xike-1; bioherm; organic compound; marine geology; stratigraphy.

0 引言

南海在新生代逐步扩张过程中,洋盆中央由残余陆块构成远离大陆的孤立高地。由于地处赤道与北回归线之间,自中新世以来南海成为全球碳酸盐台地及生物礁生长发育的重要海区(赵焕庭等,1999;汪品先,2009;马玉波等,2010)。碳酸盐台地沉积物主要由造礁生物构成,这些生物总体处于浅水环境,对海水深度、盐度、温度等环境因素的变化十分敏感,记录了大量包括海平面变化在内的古海洋学信息,是研究海平面变化及全球气候变化的重要素材,在全球古海洋学研究中占有重要地位。

西沙群岛位于 $17^{\circ}07' \sim 15^{\circ}43' \text{N}$, $111^{\circ}11' \sim 112^{\circ}54' \text{E}$,由脱离华南大陆的残余陆块构成(陈以健和焦文强,1982;业治铮等,1985;张明书等,1989)。由于其随着南海中央海盆的扩张而发生沉降并接受沉积,故记录了大量南海扩张形成以来的古海洋学事件及全球气候变化信息(王律江等,1994;汪品先,1998;Chen *et al.*,2003)。因此,自20世纪70年代以来研究人员在西沙海域进行了多口科学探测井的钻探,获取了大量研究成果(何起祥等,1986;吕炳全等,1986;毕福志和袁又申,1997)。中海油湛江分公司2013年在西沙群岛宜德环礁上的石岛进行了新一轮的科学钻探,采用新的技术及方法进行系统分析研究,以期获得研究技术及成果上的新突破。新完成的科学探井西科1井深1268.2 m,是目前为止西沙群岛取心最完整的科学钻井。本研究拟通过有机分子化合物指标 *BIT* (Branched and Isoprenoid Tetraether) 对该井0~750 m井段碳酸盐沉积物进行系统分析,揭示该地区碳酸盐的沉积发育过程及控制因素。

1 材料与方 法

本次研究对西科1井碳酸盐沉积物开展分子有机化合物分析,提取 *BIT* 指标研究西沙地区各时期沉积环境特征。*BIT* 指标是沉积物中源自陆源的细菌膜脂支链甘油双烷基链甘油四醚(branched gly-

erol dialkyl glycerol tetraethers,简称bGDGTs)与主要来自海洋泉古菌中的类异戊二烯 GDGTs(isoprenoid GDGTs,简称iGDGTs)的含量之比,通常在古环境研究中用来区分沉积物有机质类型、判断沉积环境,该方法在西沙海区碳酸盐沉积物研究中是首次运用。

岩心以10 m左右的间距系统采样,在剥蚀面等明显界面附近加大采样密度,共采集样品90个,取样深度达747.87 m。笔者对所有碳酸盐样品中的有机分子化合物进行分离、提取、定性及定量分析。具体有机质萃取方法步骤如下:将冷冻干燥后的碳酸盐样品研磨后,称取约20 g置于50 mL离心试管中,加入等体积的二氯甲烷/甲醇(体积比为3:1)混合溶液和50 μL 内标(C_{46} -GDGT)并振荡均匀。经超声仪超声10 min,3500 rpm离心分离4 min后,收集清液于45 mL玻璃瓶中,用氮气流(水浴加热不得超过40 $^{\circ}\text{C}$)吹干。重复上述操作6次,以保证样品中有机质尽量完全提取。加入300 μL 正己烷/异丙醇(体积比为99:1)混合溶液,过膜(PTFE过滤膜规格为:0.45 μm ,直径13 mm)处理并转移至2 mL玻璃瓶中。重复操作5次后再次用氮气吹干,等待上机测试。

加入50 μL 正己烷/异丙醇(体积比为99:1)混合溶液,进行液相色谱-串联四级杆质谱(Agilent 6460 Triple Quad HPLC-MS)分析。具体分析条件和步骤为:使用Prevail Cyano色谱柱(150.0 mm \times 2.1 mm,3 μm ;Alltech,USA),柱温为30 $^{\circ}\text{C}$,进样量为10 μL 。色谱分析初始5 min内,流动相为正己烷/异丙醇(体积比为99:1);在随后的5~45 min内,异丙醇以0.2 mL/min的流速线性增加至1.8%。之后正己烷/异丙醇(体积比为99:1)以0.2 mL/min的流速冲洗色谱柱10 min,再以正己烷/异丙醇(体积比为99:1)平衡10 min。应用APCI(atmospheric-pressure chemical ionization)源进行化合物离子化,质谱检测模式为选择性离子扫描,雾化压力0.41 MPa;气化温度为400 $^{\circ}\text{C}$;氮气流速为6 L/min,温度为200 $^{\circ}\text{C}$;毛细管电压为-3 kV;电流为5 μA (约3.2 kV)。GDGTs各化合物核比(m/z)为1302,1300,1298,1296,

1 292, 1 050, 1 048, 1 046, 1 036, 1 034, 1 032, 1 022, 1 020, 1 018. 通过各分子离子峰 $[M+H]^+$ 面积与加入内标面积的比值来对 GDGTs 各组分进行定量分析, 由 iGDGTs 和 bGDGTs 不同组分的含量来计算多种指标 (Schouten *et al.*, 2008). 所有样品预处理和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.

2 数据结果

经 HPLC-MS 上机测试后得到 bGDGT 和 iGDGT 相关数据. 总 GDGT 分子化合物离子强度如图 1 所示, 古菌液相色谱—质谱关系如图 2 所示, 细菌液相色谱—质谱关系如图 3 所示, 横坐标表示出

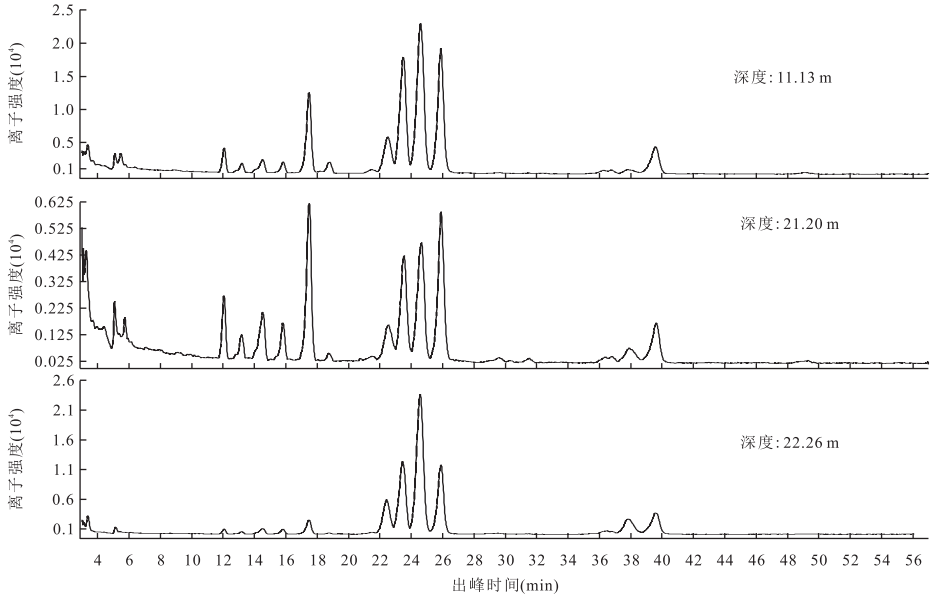


图 1 西科 1 井碳酸盐样品 GDGT 液相色谱—质谱关系

Fig.1 GDGT HPLC-MS relationship of the carbonate sample in the well Xike-1

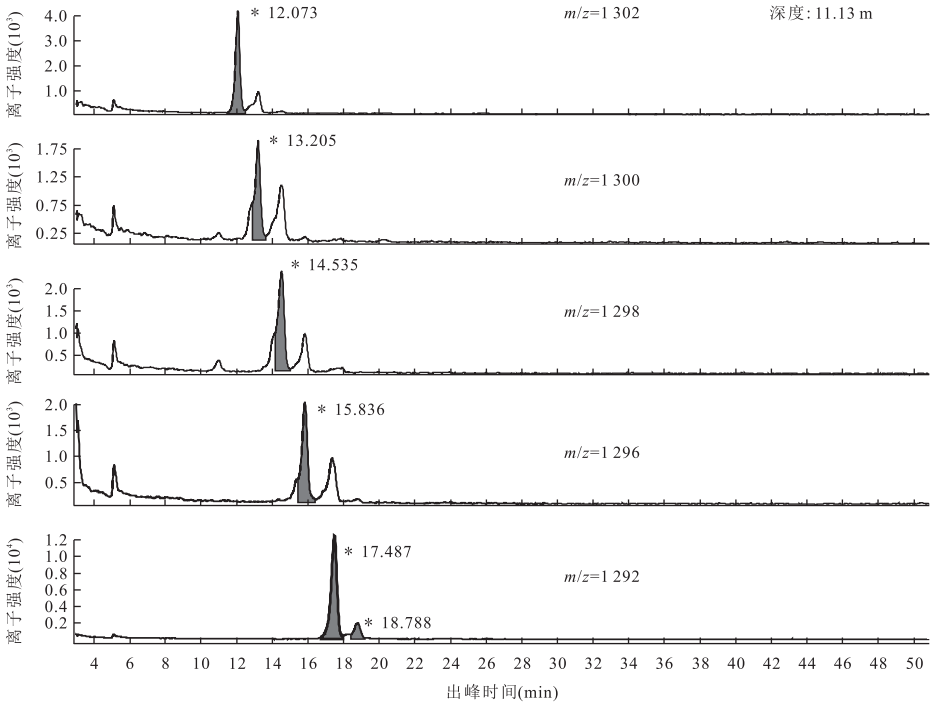


图 2 西科 1 井碳酸盐样品古菌液相色谱—质谱关系

Fig.2 iGDGT HPLC-MS relationship of the carbonate sample in the well Xike-1

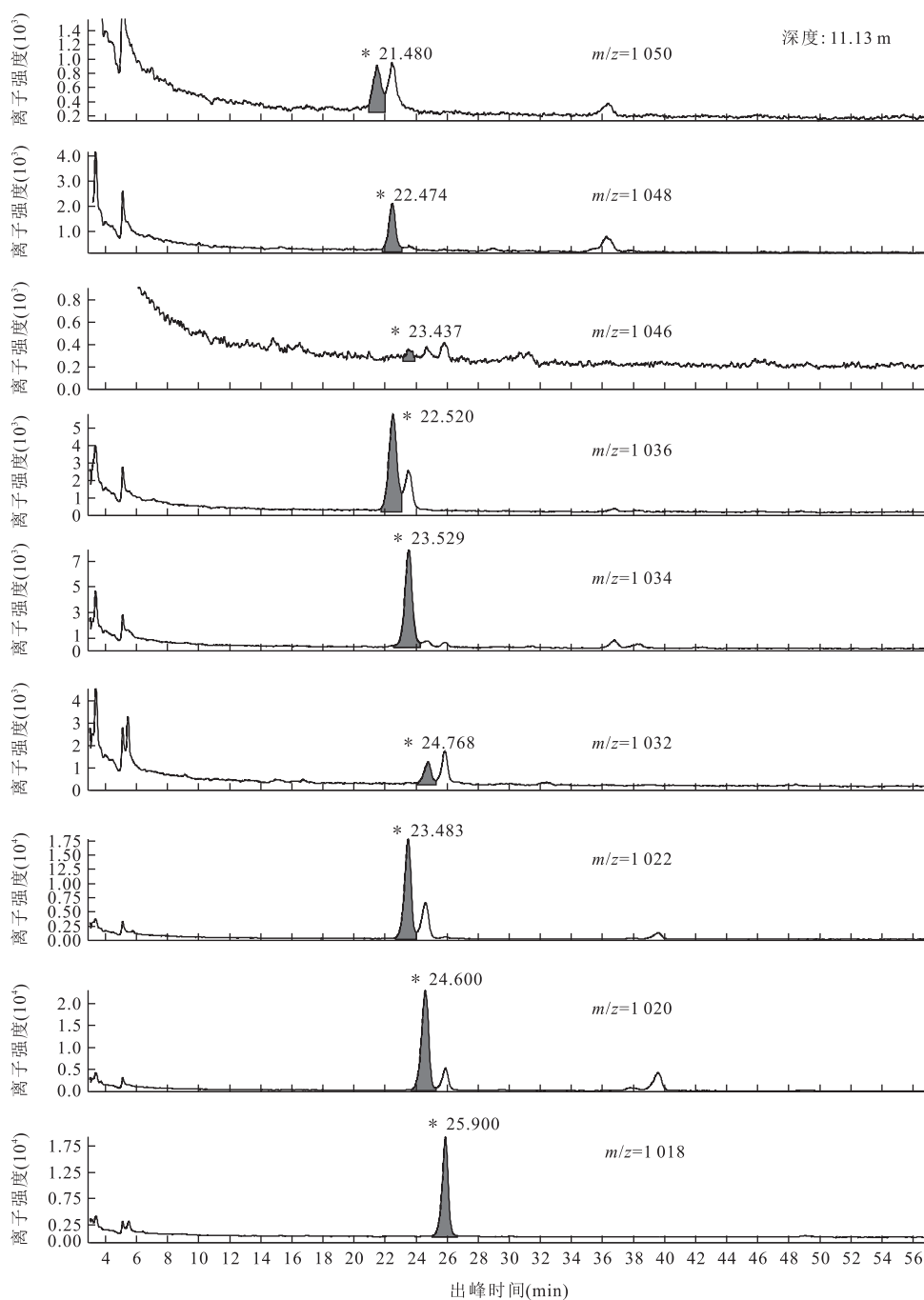


图 3 西科 1 井碳酸盐样品细菌液相色谱-质谱关系

Fig.3 bGDGT HPLC-MS relationship of the carbonate sample in the well Xike-1

峰时间,纵坐标表示离子强度,积分面积为化合物含量.

图 1 为深度分别在 11.13,21.20 和 22.26 m 处样品中 GDGT 离子强度,图中非常清楚地显示样品中分别由古菌和细菌产生的 GDGT 峰形完整,差异明显,易于辨认计算.从含量上来看,二者的含量都相对较多,细菌含量高于古菌.尽管随着地层深度增加,成岩作用强烈导致个别 GDGT 分子部分发生降

解,造成 GDGT 含量偏低,但不影响有效的 BIT 计算,这些样品在分析中仍予以保留.

3 讨论

GDGTs 是古菌和细菌等微生物细胞膜脂的主要成分(Damsté *et al.*, 2009),也是本次碳酸盐样品中有机分子化合物的主要组成部分.其中海洋泉

古菌细胞膜脂主要由 iGDGTs 组成,该类分子中环戊烷数量的增加会使泉古菌的细胞膜脂组装得更密实,有效避免双层膜在高温下变性分开,其还保持了完整的内层疏水结构,使古菌能够在极端环境下(如高温和低 pH)生存(Damsté *et al.*, 2002;姚鹏和于志刚, 2010).iGDGT 通常有 6 种分子结构,包括含有 0~3 个环戊烷的结构(I~IV),同时含有 4 个环戊烷和 1 个环己烷的结构(V),还有一个 V 的同分异构体(VI)(Schouten *et al.*, 2008; Damsté *et al.*, 2009).细菌膜脂主要由 bGDGTs 组成,这类分子化合物中的环数量和碳链中甲基数目与大气温度和土壤 pH 相关.bGDGTs 在结构和 iGDGTs 不同,它们的碳骨架具有数目不等的甲基支链,环戊烷的数量为 0~2 个,且没有环己烷结构(Weijers *et al.*, 2007).

BIT 是沉积物中细菌膜脂 bGDGTs 含量与主要来自海洋古菌的 iGDGTs 泉古菌醇含量的比值,

可以解析近海沉积物中陆源有机质的来源和分布(Hopmans *et al.*, 2004),其计算公式如下:

$$BIT = \frac{(I + II + III)}{(I + II + III + V)}$$

式中: I、II、III 分别代表 bGDGT 中质核比为 1 022、1 036 和 1 050 的化合物;V 代表 iGDGT 中质核比为 1 292 的化合物.BIT 在古环境中被用来定性追踪陆源有机质输入的历史变化(Ménot *et al.*, 2006; Sluijs *et al.*, 2006),结合其他传统指标还可以进一步区分沉积有机质来源.一般情况下, BIT 指数越接近于 1,倾向于指示陆源输入; BIT 指数越接近于 0,倾向于指示海相自生.

通过西科 1 井 BIT 随深度的变化曲线可以清楚地看到(图 4),该指数在上部 0~180 m 内绝大部分大于 0.6,少量数值保持在 0.6 左右,只有 110.19 m 处有一个异常点, BIT 值为 0.35;在中部 180~560 m, BIT 指数总体保持较低的趋势,最高

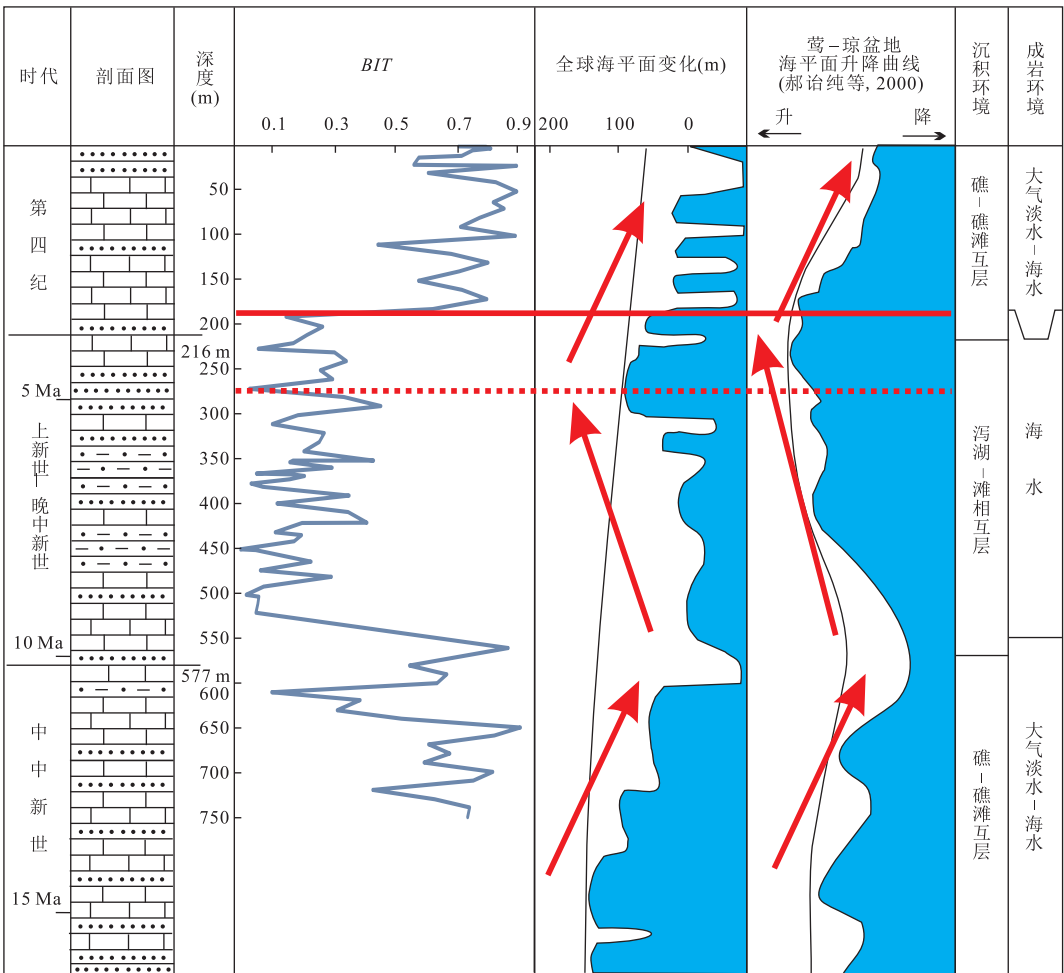


图 4 西科 1 井 BIT 变化综合分析

Fig.4 BIT variation of well Xike-1

不超过 0.5,最低可达到 0.05;在下部 560~750 m, *BIT* 指数又出现回升,期间虽然在 610~630 m 有小幅回落,但是大部分保持较大值,最高可达 0.9.

根据 *BIT* 指数变化情况,西科 1 井 0~750 m 分别以 180 m 和 560 m 为界明显分为 3 个层段.结合该井初步定年结果,可以见到 *BIT* 分界线同第四纪与上新世分界(216 m)、晚中新世与中中新世界线(576.5 m)十分接近(图 4).

西科 1 井岩性分析资料显示,该碳酸盐台地几乎全部由珊瑚、珊瑚藻等造礁生物以及有孔虫、介形虫、钙质超微生物等海洋生物组成,呈现以骨架支撑的生物礁和生物碎屑砂相互交错的沉积特点.由于西沙碳酸盐台地从中中新世形成开始,就以孤立的海洋高地形式远离大陆,鲜有陆源物质输入.若简单地按照传统 *BIT* 代表陆源输入量大小来解释其环境意义,则可能会得出错误的结论.*BIT* 指标其根本意义在于指示大气淡水所形成的有机物量的多少,其中的细菌量可以是陆源输入,也可是在大气环境下自生而成.

笔者通过该井岩心观察发现,在 0~180 m 岩心段和 560~750 m 岩心段,岩性主要以珊瑚礁与生物碎屑砂构成的生物骨架灰岩互层为特征,发育大量暴露溶蚀淋滤面,反映其沉积环境以浅水环境为主、频繁暴露地表为特征.笔者经薄片观察发现,在这两个层段中发育的成岩胶结作用是大气水及大气水—海水混合成岩环境下的典型产物,以新月形、悬垂形和晶簇状方解石胶结物为特征(图 5).对暴露面的研究,笔者发现在这两段地层中,生物礁的高频、低幅淹没一出露模式使得其中各种碳酸盐组分均遭受了不同程度的溶解作用,与薄片观察到的有孔虫、珊瑚藻、珊瑚格架、泥晶基质等发生部分或全部溶解相一致.与此相反,在埋深 180~560 m 井段,岩性主要以生物碎屑泥晶灰岩与珊瑚藻构成的生物骨架灰岩为主,对应西沙群岛碳酸盐台地主要的成礁期,代表其形成发育过程中较少暴露到大气环境.薄片观察发现该时期的成岩作用主要表现为生长于粒间或粒内孔隙中的纤维状和刀刃状方解石为特征,呈环边状分布,这种胶结物结构被公认为是海水成岩环境下的产物(图 5).

沉积环境的不同造成了沉积物中细菌和古菌总量及比值发生改变.受大气水影响时,碳酸盐台地发生淋滤作用,导致岩石遭受溶解形成许多次生孔隙,且大气水成岩环境呈弱酸性, pH 偏低的低盐环境有利于细菌的生长,使细菌含量相对于古菌增长较

快,即 bGDGT 的含量相对于 iGDGT 有较大增长,反映在 *BIT* 指标上则出现高值;当海水占主导因素时,环境中 pH 增高且相对高盐条件更有利于泉古菌数量的增加,造成 iGDGT 的含量相对于 bGDGT 增长较快,反映在 *BIT* 指标上则会出现较低值.因此,*BIT* 指标在西科 1 井随深度的变化特征完全是西沙地区碳酸盐台地生长发育受微环境变化控制的结果.

结合西科 1 井岩心观察、沉积相分析、薄片鉴定及有机分子化合物 *BIT* 指标变化特征可以看出,西沙地区珊瑚礁台地在第四纪处于海水频繁动荡的沉积环境,不利于珊瑚礁的发育保存.台地发生淋滤剥蚀,呈现出礁滩互层叠置的现象,岩层受大气淡水影响明显,该时期也恰是全球海平面及西沙北侧琼东南盆地海平面快速下降时期.受全球及区域海平面下降影响,西沙碳酸盐台地频繁暴露地表,造成地层普遍遭受大气淡水影响,使 *BIT* 指标变高.从晚中新世到上新世,全球及区域海平面变化呈现总体上升的趋势,十分有利于碳酸盐珊瑚礁台地的生长发育,西沙地区珊瑚礁台地该时期主要由珊瑚格架灰岩组成,沉积环境稳定,礁盘扩大,缺少沉积暴露淋滤面,使沉积物中海洋泉古菌含量增高,造成 *BIT* 指标变低.在中中新世,全球及西沙北侧琼东南盆地海平面同样处于快速下降时期,造成西沙地区珊瑚礁台地生长环境频繁动荡,台地频繁暴露于地表,不利于珊瑚礁的发育保存,使该时期地层呈现出礁滩互层叠置的现象,岩层受大气淡水影响明显,使沉积物中反映大气淡水环境的细菌含量增高,造成 *BIT* 指标变高(图 4).

因此,西科 1 井 *BIT* 指数很好地反映了中中新世以来南海海平面变化及碳酸盐台地生长发育的过程(图 6).在中中新世晚期,受全球及区域海平面变化下降影响,西沙地区碳酸盐台地频繁暴露地表,遭受剥蚀,使西科 1 井所处位置以溶蚀淋滤的礁相沉积为主(图 6a),形成礁—滩交互的沉积地层,地层发生大气水—海水混合作用的成岩现象.晚中新世至上新世,全球及区域海平面出现持续上升,十分有利于西沙碳酸盐台地的生长发育,该时期礁盘扩大,台地向外扩张,使西科 1 井所处位置以台地内侧泻湖相及内侧滩相沉积为主,鲜有风化暴露淋滤面出现(图 6b),该时期地层发生的成岩作用以海水环境为主.在第四纪,全球及区域海平面出现总体下降趋势,西沙碳酸盐台地又频繁暴露地表,遭受淋滤剥蚀,西科 1 井所处台地位置又出现了以礁相沉积为

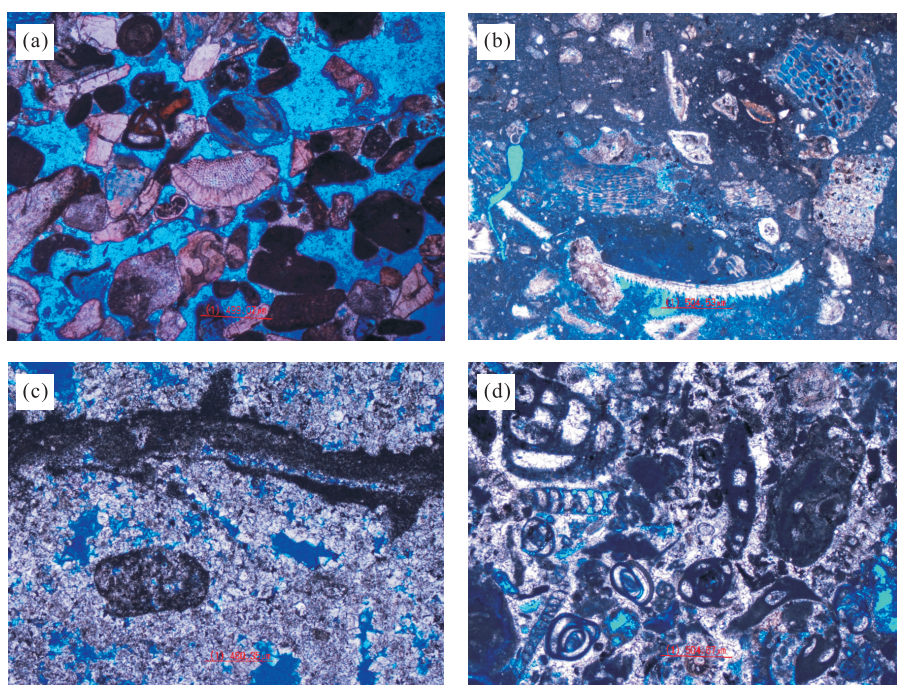


图 5 西科 1 井部分胶结类型及成岩环境

Fig.5 Cementation types and diagenetic environment of well Xike-1

a.垂悬状胶结大气淡水胶结作用,7.96 m;b.纤维状胶结海水胶结作用,251.48 m;c.镶嵌粒状胶结海水胶结作用,483.91 m;d.悬垂状及镶嵌粒状胶结大气水—海水混合胶结作用,747.67 m

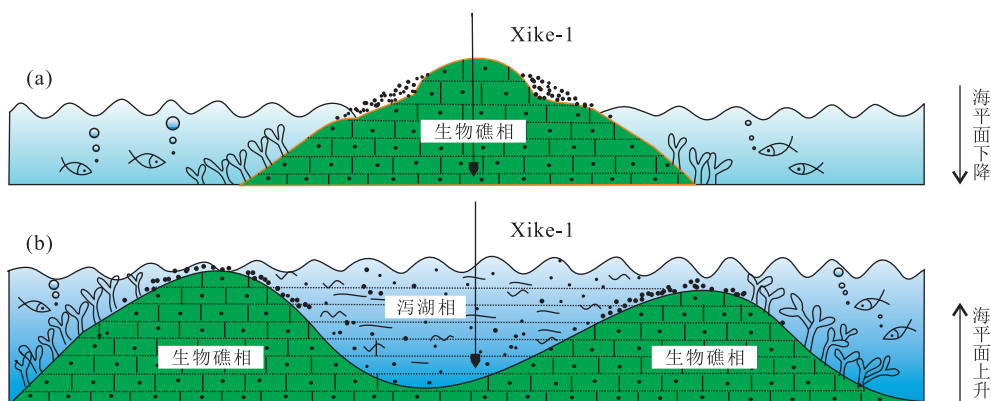


图 6 西科 1 井沉积环境与海平面变化模式

Fig.6 Schematic between sea-level change and sedimentary environment of well Xike-1

a.低海平面时期碳酸盐台地遭受侵蚀缩小;b.高海平面时期碳酸盐台地发展扩大

主的特征(图 6a),形成礁—滩交互的沉积地层,并且再次发生大气水—海水混合成岩作用。

值得指出的是,根据国际地质年代分层方案(Gradstein *et al.*, 2012),西科 1 井第四纪/上新世分界在 216 m 处,而指示 BIT 发生突变的深度在 180 m 左右,稍晚于全球海平面发生下降的时间点。但是,位于西沙地区北侧的琼东南盆地海平面变化曲线发生由上升转为下降的时间点与全球海平面变化相比也同样存在一个滞后(郝诒纯等,2000),其与

西科 1 井记录的 BIT 发生突变的时间完全一致(图 4),说明西沙地区碳酸盐台地的生长发育受区域相对海平面变化影响更大,也反映出南海海平面变化既受全球海平面变化的影响,还受南海区域构造沉降的控制。

4 结论

(1)西科 1 井 BIT 指数随深度呈现规律性变

化,呈现三段式演变,从下到上呈现高一低一高的变化特征.根据 *BIT* 指数变化情况,西科 1 井 0~750 m 井段分别以 180 m 和 560 m 为界分为 3 个层段,分界线同第四纪与上新世(分界深度 216 m)、晚中新世与中中新世界线(分界深度 576.5 m)十分接近.通过对该井岩心观察,笔者发现在 0~180 m 岩心段和 560~750 m 岩心段,岩性主要以生物碎屑砂与珊瑚礁或珊瑚藻构成的生物骨架灰岩互层为特征,发育大量暴露溶蚀淋滤面,反映其沉积环境以频繁暴露地表为特征;在埋深 180~560 m 井段,岩性主要以泻湖相生物碎屑泥晶灰岩或珊瑚藻构成的生物骨架灰岩为主,反映碳酸盐台地扩大,泻湖相发育,对应西沙群岛碳酸盐台地主要的成礁期.

(2)西科 1 井 *BIT* 指数很好地反映了中中新世以来南海海平面变化及碳酸盐台地生长发育的过程.在中中新世晚期,受全球及区域海平面变化下降影响,西沙地区碳酸盐台地频繁暴露地表,遭受剥蚀,使西科 1 井所处位置以溶蚀淋滤的礁相沉积为主,形成礁—滩交互的沉积地层.同时,由于大气淡水的影响,造成有机分子化合物中 *BIT* 指数呈现高值;到晚中新世至上新世,全球及区域海平面出现持续上升,十分有利于西沙碳酸盐台地的生长发育,该时期礁盘扩大,台地向外扩张,使西科 1 井所处位置以台地内侧泻湖相及内侧滩相沉积为主,鲜有风化暴露淋滤面出现,造成有机分子化合物中 *BIT* 指数呈现低值.在第四纪,全球及区域海平面出现总体下降趋势,西沙碳酸盐台地又频繁暴露地表,遭受淋滤剥蚀,西科 1 井所处台地位置又出现了礁—滩交互、暴露淋滤面发育的特征,造成 *BIT* 指数又呈现高值.

(3)值得指出的是,西科 1 井记录的 *BIT* 发生突变的时间在第四纪初期稍晚于全球海平面发生转折的时间点,与位于西沙地区北侧的琼东南盆地海平面变化曲线发生突变的时间点完全一致,说明西沙地区碳酸盐台地受区域相对海平面变化影响更大,也反映出南海海平面变化既受全球海平面变化的影响,也受南海区域构造沉降的控制.

References

Bi, F. Z., Yuan, Y. S., 1997. Periodic Table of Biocalcarenite Formation from the Shidao Islet. *Annual of Taiwan Museum*, 40: 155—175 (in Chinese with English abstract).

Chen, M. T., Shiao, L. J., Yu, P. S., et al., 2003. 500 000-Year Records of Carbonate, Organic Carbon, and Foraminif-

eral Sea-Surface Temperature from the Southeastern South China Sea (near Palawan Island). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 197 (1—2): 113—131. doi:10.1016/S0031-0182(03)00389-4

Chen, Y. J., Jiao, W. Q., 1982. Radiocarbon Profiles of the Rocky Islet, Xisha Islands; Evidence of Recent Crustal Movement. *Marine Geological Research*, 2 (2): 27—37 (in Chinese with English abstract).

Damsté, J. S. S., Ossebaar, J., Abbas, B., et al., 2009. Fluxes and Distribution of Tetraether Lipids in an Equatorial African Lake: Constraints on the Application of the TEX86 Palaeothermometer and BIT Index in Lacustrine Settings. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73 (14): 4232—4249. doi:10.1016/j.gca.2009.04.022

Damsté, J. S. S., Rijpstra, W. I. C., Hopmans, E. C., et al., 2002. Distribution of Membrane Lipids of Planktonic *Crenarchaeota* in the Arabian Sea. *Applied and Environmental Microbiology*, 68 (6): 2997—3002. doi: 10.1128/AEM.68.6.2997-3002.2002

Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M., et al., 2012. The Geologic Time Scale. Elsevier Science Ltd., Oxford.

Hao, Y. C., Chen, P. F., Wan, X. Q., et al., 2000. Late Tertiary Sequence Stratigraphy and Sea Level Changes in Yinggehai-Qiongdongnan Basin. *Geoscience*, 14 (3): 237—245 (in Chinese with English abstract).

He, Q. X., Zhang, M. S., Ye, Z. Z., et al., 1986. Carbon and Oxygen Stable Isotope Stratigraphy of Late Pleistocene Carbonate Deposits at Shidao Island, Xisha Islands, China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 6 (3): 1—8 (in Chinese with English abstract).

Hopmans, E. C., Weijers, J. W. H., Schefuß, E., et al., 2004. A Novel Proxy for Terrestrial Organic Matter in Sediments Based on Branched and Isoprenoid Tetraether Lipids. *Earth and Planetary Science Letters*, 224: 107—116. doi:10.1016/j.epsl.2004.05.012

Lü, B. Q., Wang, G. Z., Quan, S. Q., et al., 1986. A Preliminary Study of the Formation of Shidao Island, Xisha Island. *Scientia Geologica Sinica*, 20 (1): 82—89 (in Chinese with English abstract).

Ma, Y. B., Wu, S. G., Gu, M. F., et al., 2010. Seismic Reflection Characteristics and Depositional Model of Carbonate Platforms in Xisha Sea Area. *Acta Oceanologica Sinica*, 32 (4): 118—128 (in Chinese with English abstract).

Ménot, G., Bard, E., Rostek, F., et al., 2006. Early Reactivation of European Rivers during the Last Deglaciation. *Science*, 313 (5793): 1623—1625. doi: 10.1126/science.1130511

Schouten, S., Hopmans, E. C., Baas, M., et al., 2008. Intact

- Membrane Lipids of “*Candidatus Nitrosopumilus maritimus*” A Cultivated Representative of the Cosmopolitan Mesophilic Group I Crenarchaeota. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(8): 2433–2440. doi: 10.1128/AEM.01709-07
- Sluijs, A., Schouten, S., Pagani, M., et al., 2006. Subtropical Arctic Ocean Temperatures during the Palaeocene/Eocene Thermal Maximum. *Nature*, 441(7093): 610–613. doi: 10.1038/nature04668
- Wang, L.J., Bian, Y.H., Wang, P.X., 1994. The Last Deglaciation in the South China Sea and the Rapid Climate Return Event. *Quaternary Sciences*, 14(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P.X., 1998. Glacial Carbonate Cycles in Western Pacific Marginal Seas. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 18(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P.X., 2009. Toward Scientific Breakthrough in the South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 28(3): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Weijers, J.W.H., Schouten, S., van den Donker, J.C., et al., 2007. Environmental Controls on Bacterial Tetraether Membrane Lipid Distribution in Soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(3): 703–713. doi: 10.1016/j.gca.2006.10.003
- Yao, P., Yu, Z.G., 2010. Advances of Intact Polar Membrane Lipids as Chemical Biomarkers for Extant Microorganisms in Marine Sediments. *Advances in Earth Science*, 25(5): 474–483 (in Chinese with English abstract).
- Ye, Z.Z., He, Q.X., Zhang, M.S., et al., 1985. The Sedimentary Structures and the Facies Model of the Late Pleistocene Eolian Biocalcarenes in Shidao Island of Xisha Archipelago. *Acta Sedimentologica Sinica*, 3(1): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M.S., He, Q.X., Ye, Z.Z., et al., 1989. Study of Sedimentary Geology of Reef Carbonate in the Xisha Islands. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhao, H.T., Zhang, Q.M., Song, C.J., et al., 1999. Geomorphology and Environment of the South China Coast and the South China Sea Islands. Science Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 毕福志, 袁又申, 1997. 西沙群岛石岛生物砂屑灰岩的成岩周期表. 台湾省立博物馆年刊, 40: 155–175.
- 陈以健, 焦文强, 1982. 西沙群岛石岛的放射性碳剖面: 近代地壳运动的证据. 海洋地质研究, 2(2): 27–38.
- 郝诒纯, 陈平富, 万晓樵, 等, 2000. 南海北部莺歌海—琼东南盆地晚第三纪层序地层与海平面变化. 现代地质, 14(3): 237–245.
- 何起祥, 张明书, 业治铮, 等, 1986. 西沙群岛石岛晚更新世碳酸盐沉积物的稳定同位素地层学. 海洋地质与第四纪地质, 6(3): 1–8.
- 吕炳全, 王国忠, 全松青, 等, 1986. 试论西沙群岛石岛的形成. 地质科学, 20(1): 82–89.
- 马玉波, 吴时国, 谷明峰, 等, 2010. 西沙海区碳酸盐台地地震反射特征及沉积模式. 海洋学报, 32(4): 118–128.
- 汪品先, 1998. 西太平洋边缘海的冰期碳酸盐旋回. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(1): 1–11.
- 汪品先, 2009. 南海—我国深海研究的突破口. 热带海洋学报, 28(3): 1–4.
- 王律江, 卞云华, 汪品先, 1994. 南海北部末次冰消期及快速气候回返事件. 第四纪研究, 14(1): 1–12.
- 姚鹏, 于志刚, 2010. 海洋沉积物中现存微生物化学标志物完整极性膜脂研究进展. 地球科学进展, 25(5): 474–483.
- 业治铮, 何起祥, 张明书, 等, 1985. 西沙石岛晚更新世风成生物砂屑灰岩的沉积构造和相模式. 沉积学报, 3(1): 1–15.
- 张明书, 何起祥, 业治铮, 等, 1989. 西沙生物礁碳酸盐沉积地质学研究. 北京: 科学出版社.
- 赵焕庭, 张乔民, 宋朝景, 等, 1999. 华南海岸和南海诸岛地貌与环境. 北京: 科学出版社.