

中国南海西沙地区西科1井中新统梅山组白云岩特征及成因

银河¹,王亚辉²,刘娟²,时志强¹,张道军²

[1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 中海石油(中国)有限公司 湛江分公司, 广东 湛江 524057]

摘要:南海新生代碳酸盐台地发育,在西沙地区碳酸盐岩层序中白云岩常见。通过对西科1井白云岩的宏观形态、微观特征以及碳、氧同位素、主微量元素测试分析,描述了中新统梅山组白云岩的特征。西科1井梅山组主要发育4套厚度不一的白云岩层,颜色各异,孔隙发育。厚层白云岩中可见砂糖状白云岩,且往往分布在古暴露面之下;薄层白云岩表现为弱固结,白云岩化不彻底。白云石晶体以平直面半自形-自形晶为主,部分粉、细晶白云石发育雾心亮边。梅山组碳酸盐岩的碳、氧同位素值整体呈现一定的相关性,而白云岩的碳、氧同位素值相关性不明显。白云岩沉积时的古盐度值略高于正常海水,且白云岩层中氧同位素值均为正值,说明其不受岩浆热液流体及有机酸溶液的影响。梅山组薄层白云岩多为灰质云岩,白云岩整体具有低铁、低锶、低锰的特征,说明其镁离子来源主要为海源。稀土元素具有低Ce、低Eu的特点,综合认为梅山组白云岩以渗透回流成因为主,且受到地热增温的影响,具有高孔隙度、高渗透率的特点,具有良好的储层潜力。

关键词:地球化学;岩石学特征;白云岩;梅山组;中新世;南海

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and origin of dolostones in the Miocene Meishan Formation in Well Xike 1, Xisha Islands, South China Sea

Yin He¹, Wang Yahui², Liu Juan², Shi Zhiqiang¹, Zhang Daojun²

[1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Zhanjiang Branch of CNOOC (China), Zhanjiang, Guangdong 524057, China]

Abstract: Cenozoic carbonate platform was well developed in South China Sea, and dolostones are quite common in carbonate sequences of Xisha Islands. The characteristics of the Miocene Meishan dolomite is described by studying the macro-and micro-scope features of dolostones, the carbon and oxygen isotopes, and main/trace elements in Well Xike 1. Mainly four categories of dolostones were developed in the Meishan Formation in Well Xike 1, which are different in thickness, color and porosity. Sucrosic dolomites, commonly distributed under the ancient exposed surface, can be seen in thick-bedded dolostones. While thin-bedded dolostones feature loose consolidation and incomplete dolomitization. The dolomite crystals are dominated by subhedral-idiomorphic flat surfaces, and bright edge and foggy center are seen in some dolomites of very fine to fine-crystallized crystals. The carbon and oxygen isotopes of carbonate rocks in the Meishan Formation show certain correlation, while the correlation of carbon and oxygen isotopic values in the dolostones is insignificant. The paleosalinity value of dolostones is calculated to be slightly higher than that of contemporaneous seawater. The oxygen isotopic value of dolostones is positive, indicating that the dolomitization was not affected by magmatic hydrothermal fluids and organic acid solution. Most thin-bedded dolomites in the Meishan Formation are calcareous dolostones, low in Fe, Sr and Mn concentrations, suggesting that the source of magnesium ions is mainly seawater. The rare earth elements (REE) are characterized by low Ce and Eu. In conclusion, the dolomitization in the study might have been caused by seepage reflux, and is characterized by high porosity and permeability as a result of geothermal warming,

收稿日期:2019-08-01;修订日期:2019-10-28。

第一作者简介:银河(1993—),男,硕士研究生,沉积学。E-mail:717819782@qq.com。

通讯作者简介:时志强(1972—),男,教授、博士生导师。E-mail:szqcdut@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05026-005-003)。

implying good reservoir potential.

Key words: geochemistry, petrological characteristics, dolostone, Meishan Formation, Miocene, South China Sea

南海具有较为特殊的构造背景,其位于3大板块(太平洋、亚欧及印-澳板块)交汇处,因其构造特殊性决定了其生物礁生长发育有“东早西晚、南早北晚”的特点^[1-2]。西沙地区新生界碳酸盐岩发育,连续沉积的礁相碳酸盐岩中主微量元素及同位素均具有分段性,对古气候变化、青藏高原的隆升、火山活动和古海洋事件的研究起到了很好的侧面响应作用^[3]。西沙地区的生物礁最早发育在中新世早期,由于其处于独特的地理位置(赤道与北纬30°之间),很适合生物礁的生长,因此也称西沙地区是“地球上最好的实验室”^[4-8]。受地质构造、海平面升降及古环境古气候等因素的影响,西沙地区的生物礁的发育特点、储层物性以及成岩过程均有差异性^[9]。

西科1井作为南海取心完整、取心率高的科学钻井^[10],对中国在南海区块油气勘探有重要的借鉴意义,同时对新生界碳酸盐岩研究有理论意义。到目前为止,前人对西沙地区白云岩的成因有了一定的研究^[11-18],他们均以大套较纯的白云岩层为研究背景进行讨论,而梅山组不仅有较厚的纯白云岩层,还包含有灰质白云岩与白云质灰岩互层,疙瘩状白云岩在松散的灰岩中产出(本文统称其为薄层白云岩),梅山组白云岩中含更为丰富和更为复杂的白云岩化地质信息,值得深入探讨。

1 地质背景

南海地处中国南部,是被大陆与岛屿包围呈菱形的特殊边缘海^[19-22]。由于其特殊的构造地理位置,使其长时间经历了板块构造的影响^[23-24],地质演化的特征也相对复杂。南海区块于泥盆纪早期,由古特提斯洋的出现和冈瓦纳古陆东北部的裂解所形成,并向北漂移到现在地理位置附近^[25]。而后在新生代早期又受到其北部陆壳强烈的拉张作用,使得早期基底破坏严重,表现出东部向陆俯冲,北部拉张,西部剪切与拉张,南部则挤压严重的构造现象,相对来说南海东部的大陆边缘比西部拉伸作用更强^[26-28]。同时,由于南海经历了多期的构造运动影响,现今对盆地新生代基底的认识还存在争议^[29-31]。

西沙群岛由40余个滩、礁、岛、砂洲等组成,构成了中国南海地区陆地面积最大的群岛^[7,26]。西沙地区属于隆起区,海水相对较浅,基底之上的沉积地层较

薄^[32](图1),其也是远离大陆的一个孤立碳酸盐岩台地,受陆源物质的影响较小^[33],这也预示着更多地受到古海洋化学条件的影响。西沙群岛具有纬度低、温度适中、表层海水盐度高、生物种类繁多等特点,这些都有利于该区碳酸盐岩沉积及大规模成礁^[14-15],因此晚渐新世至今均能见到生物礁发育^[10,34]。

迄今为止西沙地区共有5口取心井,分别为西永1井(完钻井深1384.68 m)、西永2井(井深600.02 m)、西石1井(井深200.63 m)、西琛1井(井深802.17 m)和西科1井(井深1257.52 m)。前人对这些井的新生界碳酸盐岩岩石学特征^[35-37]、层序地层^[38-39]、古土壤与古气候^[11,40]、古环境^[41]、古生物^[42-43]、碳酸盐台地演化^[44]等均有一定的认识,并通过对西科1井基底之上碳酸盐沉积物研究建立起生物礁生长模型及9个三级层序沉积演化序列^[10,38]。其 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线的变化与全球的主要大洋有较好的一致性^[45],说明南海海平面变化受到全球及区域构造沉降的影响^[12,35,44],岛礁的发育很大程度上受到导致海平面变化的古气候的影响^[13]。

2 研究方法

本次研究所应用的微观薄片为0.5 m间隔内至少取1个样品,初步鉴定出白云岩与灰岩。碳酸盐岩元素分析测试则根据岩石的产出层位、固结程度以及岩石颜色等宏观特征来选取测试样品,以选取白云岩样品为主,样品尽量覆盖到梅山组每一个白云岩层。准确判定其岩性参照高福红等(2017)计算方法,根据MgO及CaO含量计算出方解石和白云石的质量分数后定名。碳、氧同位素分析测试主要由中国科学院南京地质古生物研究所完成,使用MAT-253同位素质谱仪,参比标准为GBW-04405, $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)测试值标准偏差小于0.040, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)测试值标准偏差小于0.080。

主、微量元素数据主要由中国科学院海洋研究所提供测试,按上述选样要求挑选新鲜岩石样品,经玛瑙钵均匀碾磨至200目以下并送样测试分析。常量元素由X-射线荧光光谱分析方法(XRF),采用仪器为荷兰的PANalytical PW2424型光谱仪,在大批量测样前,称取3份样品进行试样,以确定其硫元素(S)含量是否小于3%,梅山组样品符合S小于3%的要求。另取

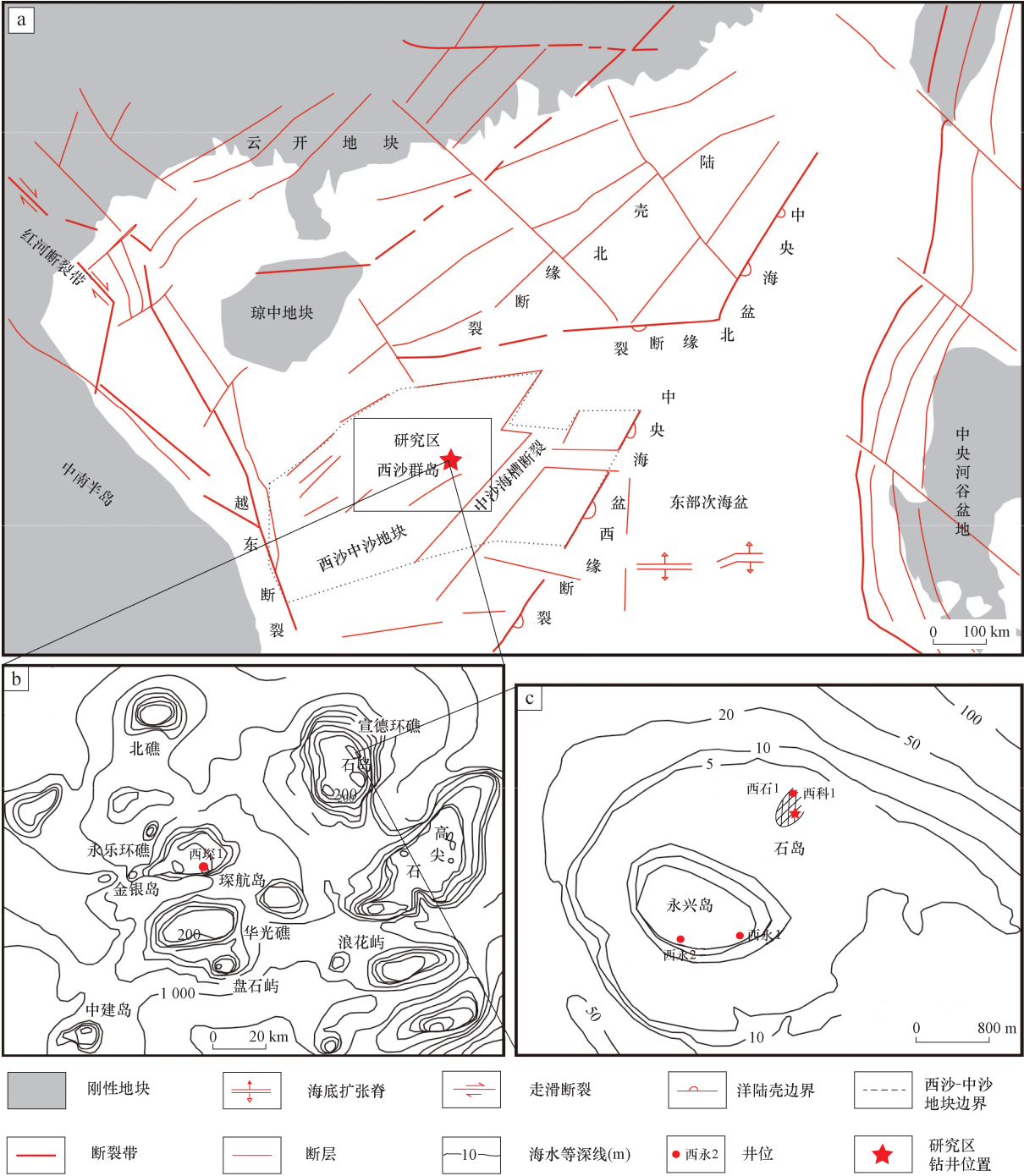


图 1 南海北部陆坡构造区划及西科 1 井位置(据文献[16,47]有修改)

Fig. 1 Structural elements division of the northern slope of the South China Sea and the location of the Well XiKe 1 (modified from references[16,47])

a. 南海构造区划示意图; b. 西沙地区岛屿分布; c. 永兴岛及石岛钻井分布

一份试样预干燥后,加入助溶剂充分混合使其高温熔融,最后将熔融物导入铂金模子中形成变频玻璃片后用 X-射线荧光光谱仪分析,再取一份试样放入马弗炉中以 1 000 ℃ 的高温加热 1 h,待其冷却后称重,以确定样品的烧失量,并且参比 GBW07120,测得的元素精密度控制在相对标准偏差小于 5%,准确控制相对

误差小于 2%,最终结果符合测试相关要求。微量元素采用电感耦合等离子体质谱方法(ICP-MS)在中国科学院青岛海洋研究所进行测试,采用美国 Gilent 7 700 × 仪器,将称取的 40 mg 样品进行溶酸处理,采用的是 1:10 的氢氟酸与硝酸的混合溶液,在充分溶解后将其蒸干并加入稀硝酸定容,定容以后用 ICP-MS

进行分析,测得元素误差范围控制在10%以内。为保证实验的精确性,采用内标溶液、由平行样和空白样等方法手段控制其精度。

3 白云岩岩石学特征

3.1 宏观特征

西科1井中新统梅山组(井深576.50~1 032.46 m)分为上、下两段^[46]:梅山组一段(梅一段)井深为576.50~758.40 m,梅二段为758.40~1 032.46 m。梅山组上覆地层为黄流组二段(黄二段)白色、灰白色及土黄色云岩。梅一段发育礁灰岩、生屑灰岩以及礁云岩,颜色主要以灰白色、棕褐色为主。梅二段主要发育灰黄色、灰白色白云岩,灰白色灰岩。梅山组灰岩固结程度由松散到半固结,白云岩则固结程度相对较好,因此很好将白云岩与灰岩区分开。梅山组下伏地层为三亚组一段,其主要岩性为灰白色、土黄色、褐红色白云岩,疑与古暴露面有关(图2)。

本次研究将单层白云岩厚度大(累计厚度大于15 m),且白云石平均含量大于75%,视为厚层白云岩;将单层白云岩(或为灰质白云岩)厚度较小、白云石平均含量变化大(大于75%或在50%~75%)的岩层,视为薄层白云岩。西科1井中新统梅山组主要发育3套厚层白云岩,2套薄层白云岩,由于第2套薄层白云岩厚度较小,因此将两套薄层白云岩统称为薄层白云岩(图2),从柱状图中可以看出,白云岩的厚度与出现的井深、出现的频率均无良好的相关性,可判定埋深对其作用较弱。白云岩层不同程度地发育珊瑚、双壳以及腹足等生物碎屑(图3e)。第1套厚层白云岩主要发育在梅一段中、上部(井深615.20~636.96 m,累计厚度21.76 m),白云岩主体呈灰白色、棕黄色,可见棕褐色砂糖状白云岩及其斑块,孔隙、裂隙较为发育,岩心表面清晰可见(图3b,c)。第2套厚层白云岩发育在梅二段顶部(井深758.4~775.9 m,累计厚度17.5 m),颜色呈灰黄色、灰白色、棕褐色,固结程度高,溶蚀孔洞较为发育,底部见褐色铁质侵染的细小裂缝,生屑铸模孔较为发育,该白云岩层顶部发育黄色及褐色不规则状条带(图3d),局部溶蚀孔洞发育(图3f),其中下部发育灰白色砂糖状白云岩,局部呈灰棕色,质地坚硬,孔隙发育且不均匀(图3g),该套白云岩整体由上及下白云石含量减少,而方解石含量增多,直至以白色、褐白色生屑灰岩为主,夹浅棕色、灰色白云岩斑块,白云岩含量小于5%,灰岩中铸模孔也较为发育。第3套厚层白云岩发育在梅二段中、下部(井

深964.96~1 025.06 m,累计厚度60.10 m),主体为白色、灰白色白云岩,孔隙较为发育,局部溶蚀孔隙发育呈蜂巢状(图3k),白色白云岩层中见黑色条带状物质(图3l),其底部发育浅褐色白云岩,褐色云岩局部呈条纹状,可能为古暴露面之上的海侵沉积。

薄层白云岩发育在梅二段中部(井深896.70~910.72 m,累计厚度14.02 m;井深936.26~940.06 m,累计厚度3.8 m)发育白色-灰白色灰质云岩及白色白云岩,白云岩层相对灰岩层更坚硬,而灰岩层弱固结、较为松散,因此肉眼便可大致区分,(含灰、灰质)白云岩层中局部可见黑色条带状物质浸染,局部发育棕黄色斑块,生物铸模孔发育(图3i,j)。云质灰岩固结程度松散-半固结,偶见棕黄色白云石晶体出现于白云岩斑块中,而白色灰岩则更趋松散,固结程度较差(图3h)。

3.2 微观特征

3套厚层白云岩主要以粉晶-细晶白云石组成(图4b,g,h,j,k),白云石晶体为半自形-自形,晶体较为明亮的为平直面自形晶,发育在孔隙或基质中,每层白云岩中均可见雾心亮边白云石,白云石总体看起来较污浊(图4e,g-i)。孔隙较为发育,主要为生物铸模孔、生物格架孔以及晶间孔,孔隙周边可见较干净明亮的白云石(图4a,d,g,i,j,l)。第2套厚层白云石晶体大小相对较粗,总体以细晶为主(图4e),白云石的含量及大小均有向下变小、变少的趋势。整个白云岩层中的灰质云岩普遍发育白云岩化不彻底现象和去白云岩化等现象(图4c,f)。白云岩层不同程度地发育生屑(以双壳、藻团块、棘皮及有孔虫为主),且生屑白云石化程度不一,红藻及棘皮类生物碎屑白云石化作用比有孔虫更彻底(图4f),白云岩层中白云岩厚度及白云石发育程度一定程度受到了红藻含量控制,显示出红藻在白云石化过程里更易、更早发生白云石交代作用(图4l)。第3套厚层白云岩中红藻、棘皮类碎屑含量最高,其厚度也相对较厚。

值得注意的是在两套薄层白云岩中仅发育1 m左右的较纯粉晶云岩(图4g),发育生物铸模孔且少见残余生屑,白云石化较为彻底,而在其附近层位可见有孔虫、红藻等白云石化不彻底(图4f)(这一现象在薄层白云岩上覆及下伏岩层中也普遍发育),但在其孔隙或者基质中可见较大晶形(粉晶-细晶)的白云石,且晶体干净明亮、自形程度较好、呈平直晶面(图4k),在部分白云石中见沿解理面发育去白云化现象。梅山组整体看来白云石的晶粒大小有向下增大的趋势,可能是受到地温梯度的影响^[12,48]。

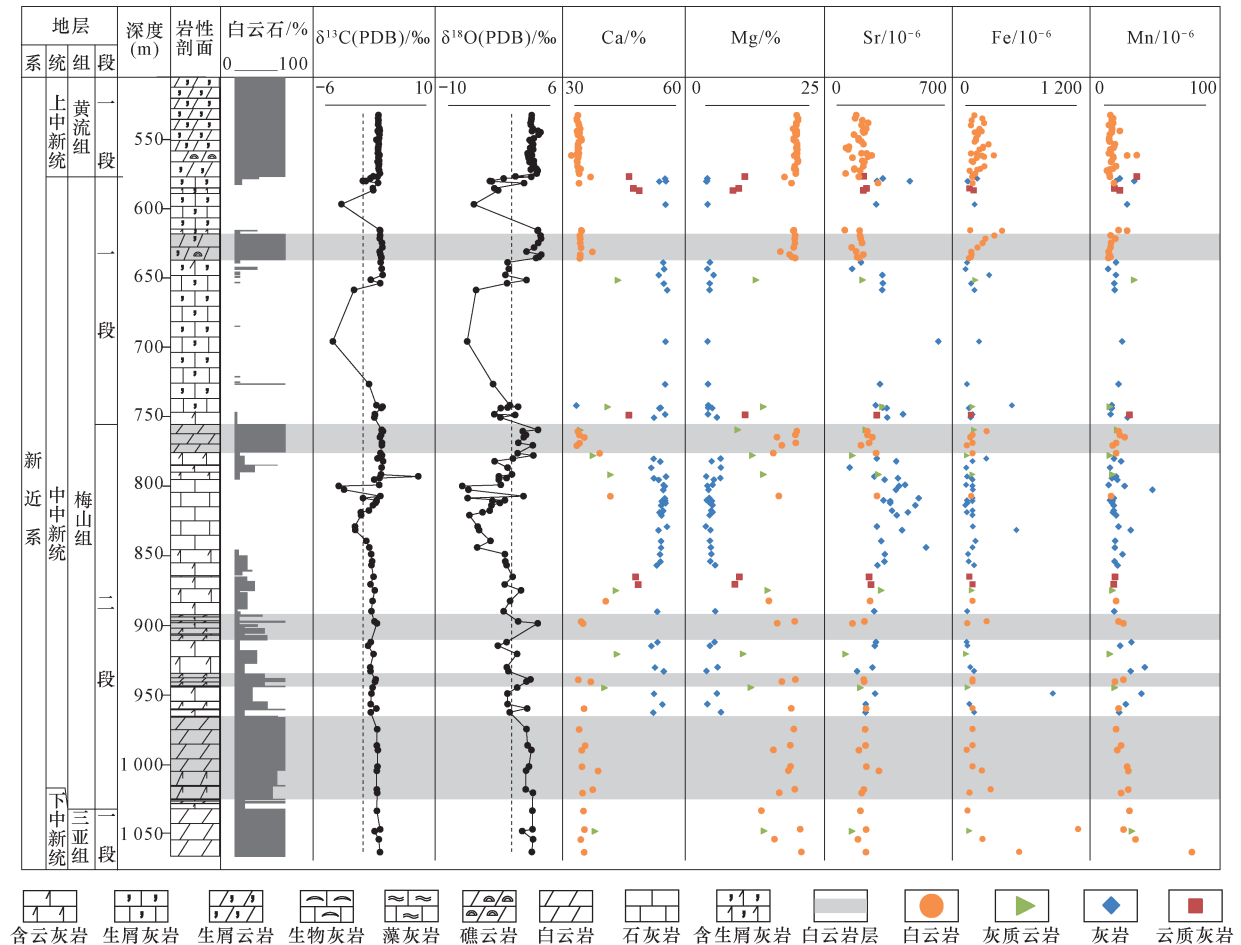


图 2 西沙地区西科 1 井中新统梅山组综合柱状图

Fig. 2 Composite column of the Miocene Meishan Formation in Well Xike 1, Xisha Islands

3.3 地球化学特征

3.3.1 主、微量元素

西科 1 井梅山组共测 94 件样品,其 MgO 与 CaO 含量具有负相关性,锶元素含量在 $45 \times 10^{-6} \sim 586 \times 10^{-6}$,平均值为 223.38×10^{-6} ;铁元素在 $2 \times 10^{-6} \sim 861.25 \times 10^{-6}$,平均值为 90.61×10^{-6} ;锰元素含量为 $3.4 \times 10^{-6} \sim 39.39 \times 10^{-6}$,平均值为 11.72×10^{-6} 。其中 619.14 m 处白云石,测得铁元素值为 $30\,276 \times 10^{-6}$,测得锰元素值为 403×10^{-6} ,扫描电镜下见其孔隙中含有较多的铁、锰质物质,可能与古暴露有关。碳酸盐岩微量元素数据总体呈现出低铁、低锰和中等含量锶的特点(图 2),由此可知其当时处于氧化条件下,成岩环境总体上来说属于相对封闭^[49-50]。Mn/Sr 可确定成岩蚀变的强弱,锰与锶之间的比值越小说明其成岩蚀变越低,一般认为 Mn/Sr 小于 2 则受到的成岩蚀变较小或未受到成岩蚀变的影响^[51],研究区 Mn/Sr 均小于 1,证明其受到成岩蚀变较弱。通过对 4 套白云岩的主微量元素统计可看出,各

层白云岩样品的 Sr、Fe 和 Mn 的含量都非常接近,都具有低锶、低铁及低锰含量的特点,且灰岩与白云岩的 Mn 和 Fe 元素具有相似的区间值(表 1;图 2),说明这 4 层白云岩的流体性质非常相似,显示其白云岩化流体应为相似的来源;从 Ca/Mg 的值也可以看出薄层白云岩的纯度不高。梅山组的灰岩样的 Sr 元素平均值为 224.32×10^{-6} ,而白云岩层与灰岩层相比具有较低的 Sr 值,可能由于白云岩化作用引起,因为 Sr 元素只能取代白云石中的 Ca,而 Mg 是无法取代的,这使得导致它在白云石中的分配系数低,因此出现低值^[52]。

3.3.2 碳、氧同位素

本次测试梅山组样品共 94 件,其中 792.4 m 深度的碳同位素数据达 8.759‰,与附近值有极其明显的差距(图 2),猜测是实验过程操作失误造成的,因此将其不予讨论。碳同位素变化范围在 $-4.788\text{‰} \sim 3.176\text{‰}$,平均值为 1.710‰;氧同位素变化范围在 $-7.021\text{‰} \sim 4.619\text{‰}$,平均值为 -0.296‰ ,且根据 Keith (1964)提出的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值二者结合起来可用于指示

流体的古盐度大小(Z 值),即 $Z = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50)$,正常海水的 Z 值为120左右, Z 大于120则显示为海水成岩环境,而梅山组的值均大于120,均值为127.3,说明其成岩环境为海水环境。碳同位素与氧同位素相关系数的平方为0.58,具有一定的相关性(图5c),而白云岩共27件样品处于较高值

区域居多,并且碳、氧同位素值完全缺乏相关性,表明在白云岩化过程中岩浆来源流体亦或生物产生的有机酸对其没有产生影响。氧同位素值与 MgO 含量有很好的正相关性,相关系数的平方达0.67,而碳同位素值与 MgO 含量的相关性较差($R^2 = 0.24$),表明氧同位素在白云岩化过程中表现得更为敏感(图5a,b)。

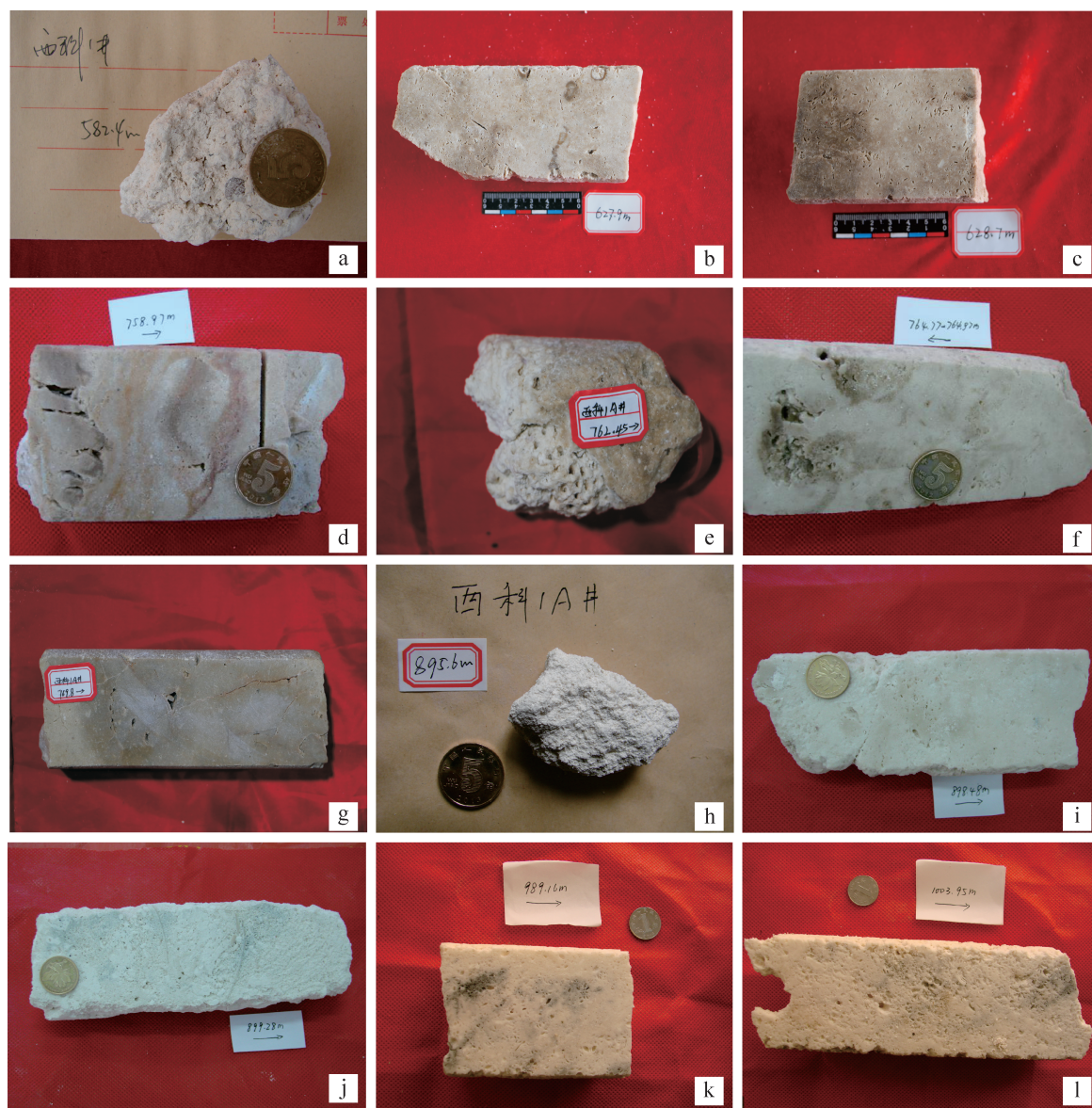


图3 西沙地区西科1井梅山组白云岩宏观特征

Fig. 3 Macroscopic characteristics of the dolostones in the Meishan Formation in Well XiKe 1, Xisha Islands

a. 中中新统梅一段,埋深582.40 m,半固结淡黄色灰岩中见厘米级方解石结核;b. 梅一段,灰色白云岩,埋深627.90 m,坚硬,生屑及孔隙发育,局部可见黄棕色斑块;c. 梅一段灰棕色白云岩,埋深628.70 m,截切面孔隙发育,且不规则分布;d. 梅二段顶部灰色白云岩,埋深758.97 m,发育黄色及褐色不规则状条带,溶蚀孔洞及小裂缝均可见,推测与古暴露面有关,另见古喀斯特溶解现象;e. 梅二段棕灰色白云岩,埋深762.45 m,可见生物礁发育;f. 梅二段近顶部灰白色砂糖状白云岩,埋深764.77~764.92 m,局部孔洞发育处白云石呈灰棕色;g. 梅二段灰棕色砂糖状白云岩,埋深769.80 m,局部可见孔隙及裂缝发育;h. 梅二段云质灰岩,埋深895.60 m,固结程度松散-半固结,白云岩呈疙瘩状;i. 梅二段灰白色白云岩,埋深898.48 m,微孔隙发育,且可见棕色斑块;j. 梅二段白色白云岩,埋深899.28 m,孔洞发育,发育黑色物质(黑锰矿?),生屑较为发育;k. 梅二段白色白云岩,埋深989.16 m,孔隙较为发育却发育锰质黑色矿物条带,溶蚀孔隙发育呈蜂巢状;l. 梅二段白色白云岩,埋深1 003.95 m,孔洞发育,其下部褐色云岩局部呈条纹状,推测为不整合面(古暴露面)之上的海侵沉积

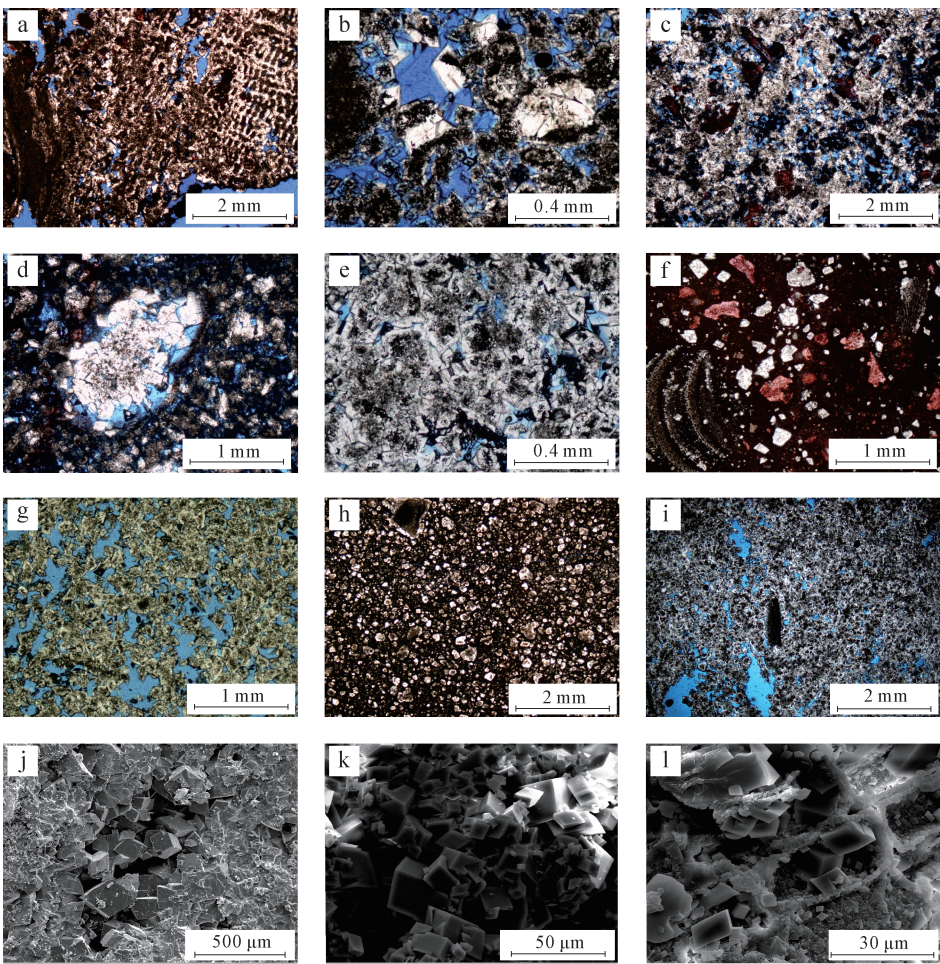


图 4 西沙地区西科 1 井梅山组白云岩微观特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of the Meishan Formation in Well XiKe 1, Xisha Islands

a. 第 1 套厚层白云岩中灰质白云岩中生物格架孔中见亮晶白云石,梅一段,埋深 618.74 m,单偏光;b. 第 1 套厚层白云岩中粉晶-细晶不等粒白云岩,亮晶白云石胶结物沉淀于孔隙中,晶体大,梅一段,埋深 621.97 m,单偏光;c. 第 1 套厚层白云岩中灰质白云岩,粉晶白云石交代成因的残余生屑,梅一段,埋深 630.43 m,单偏光;d. 第 2 套厚层白云岩中灰质白云岩,生屑铸模孔中粉晶-细晶白云石半自形晶-自形晶,具雾心亮边,部分白云石有去云化现象,梅二段,埋深 758.08 m,单偏光;e. 第 2 套厚层白云岩中粉晶-细晶白云岩,白云石发育雾心亮边,相对上部白云石较大且多,梅二段,埋深 773.16 m,单偏光;f. 薄层白云岩中白云质灰岩,发育亮晶白云石,白云石呈半自形-自形晶,干净且明亮,红藻白云岩化较彻底,而其他生屑白云岩化程度较弱,部分亮晶白云石沿解理面发育去白云岩化现象,梅二段,埋深 901.61 m,单偏光;g. 薄层白云岩中粉晶-细晶白云岩,自形晶白云石具雾心亮边,梅二段,埋深 938.36 m,单偏光;h. 第 3 套厚层白云岩中粉晶-细晶白云岩,发育亮晶白云石,生屑被白云石交代轮廓清晰可见,整体看来白云石较脏,发育雾心亮边白云石,孔隙性不好,梅二段,埋深 978.49 m,单偏光;i. 第 3 套厚层白云岩中粉-细晶白云岩,白云石雾心亮边明显,生屑具有残余结构,生物铸模孔发育,梅二段,埋深 1 025.06 m,单偏光;j. 第 2 套厚层白云岩中粉晶-细晶白云岩,晶体以自形晶为主,溶孔中见不等粒白云石晶体,梅二段,埋深 761.00 m;k. 薄层白云岩中粉晶白云岩中见生物结构,生物体腔孔中见自形程度高的白云石,梅二段,埋深 897.90 m;l. 第 3 套厚层白云岩中藻云岩,红藻体腔中多由微晶白云石组成,而细晶白云石存在于孔隙附近,梅二段,埋深 966.90 m

表 1 西沙地区西科 1 井梅山组不同层位主、微量元素值范围

Table 1 Range of major and trace element concentration values in different units of the Meishan Formation in Well XiKe 1, Xisha Islands

白云岩层位	件数	CaO/%	MgO/%	Sr/ 10^{-6}	TFe/ 10^{-6}	Mn/ 10^{-6}
第 1 套厚层	10	34.06 ~ 37.19/345.64	15.08 ~ 18.66/18.06	45.0 ~ 152.0/118.6	37.0 ~ 362.0/139.0	3.6 ~ 19.0/7.4
第 2 套厚层	6	33.30 ~ 39.00/34.85	14.10 ~ 19.00/16.89	139.0 ~ 226.0/184.5	15.0 ~ 210.0/80.3	7.1 ~ 17.0/11.5
薄层	4	33.70 ~ 36.80/34.90	18.55 ~ 18.70/17.02	90.0 ~ 159.0/140.3	19.0 ~ 210.0/92.3	9.0 ~ 16.0/13.3
第 3 套厚层	7	33.90 ~ 38.62/35.60	14.13 ~ 18.59/17.02	127.0 ~ 242.0/166.5	14.0 ~ 248.6/96.7	10.0 ~ 20.1/15.4

注:表中数据为最小值~最大值/平均值。

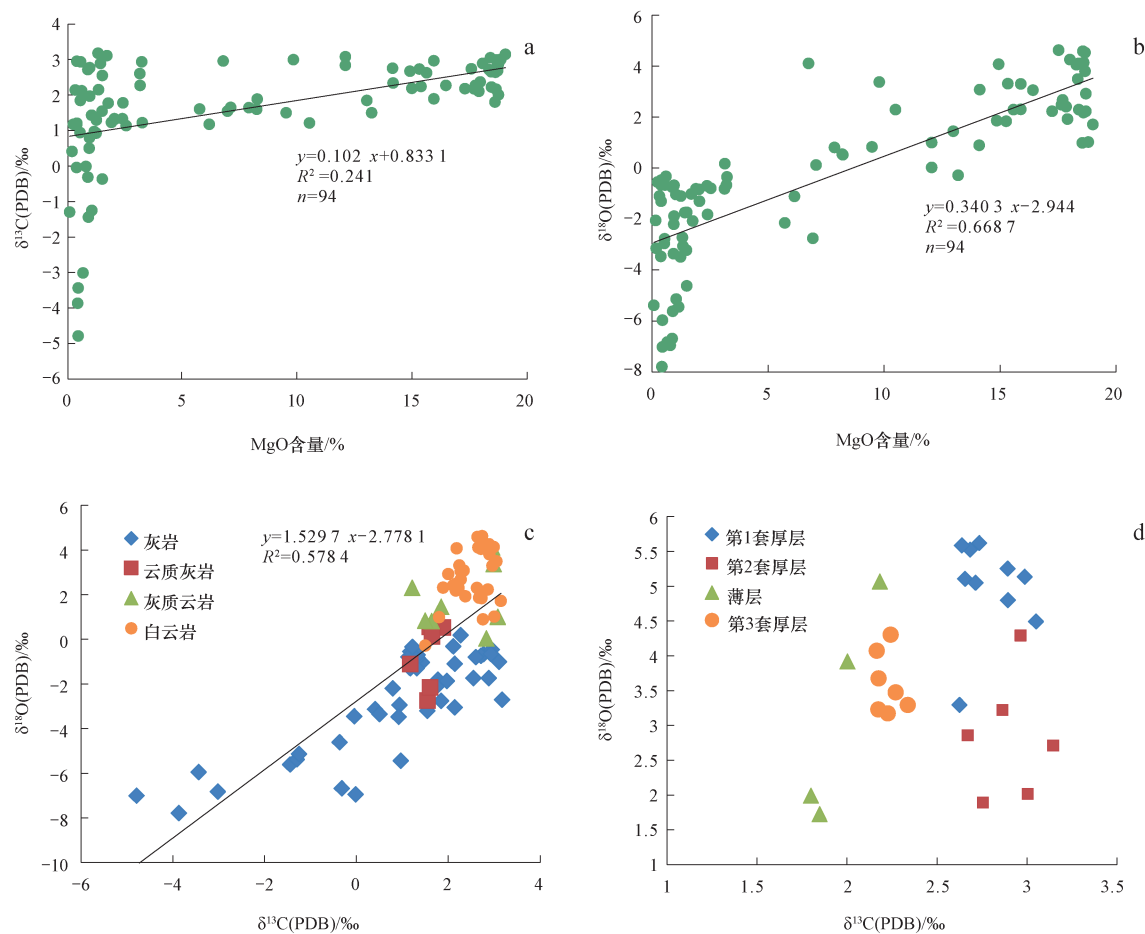


图 5 西沙地区西科 1 井梅山组碳酸盐岩碳、氧同位素特征

Fig. 5 Carbon and oxygen isotopic values of carbonate rocks in the Meishan Formation in Well XiKe 1, Xisha Islands

a. MgO 含量与 $\delta^{13}\text{C(PDB)}$ 的相关性; b. MgO 含量与 $\delta^{18}\text{O(PDB)}$ 的相关性; c. 不同岩性下 $\delta^{13}\text{C(PDB)}$ 与 $\delta^{18}\text{O(PDB)}$ 的相关性; d. 不同层位白云岩及灰质云岩 $\delta^{13}\text{C(PDB)}$ 与 $\delta^{18}\text{O(PDB)}$ 的相关性

梅山组 94 件碳、氧同位素数据中,白云岩共 32 件(其中位于 4 套白云岩层中的 27 件),灰岩 48 件,灰质云岩 8 件和云质灰岩样品 6 件(表 2)。由表中数据可以看出,4 套白云岩层的碳、氧同位素值明显与灰岩中的不同,白云岩层中的碳、氧同位素值整体均为正值(图 5d),而灰岩中的碳、氧同位素值整体更倾向于负值,白云岩中碳同位素表明白云岩化过程中对原始灰岩中碳的继承性。岩石的白云岩化过程会使较轻的氧在其作用过程中排出,而相对来说重的氧富集,因而从灰岩到白云岩,随白云岩化作用的增强,其氧同位素的值也更趋向于正值^[52]。白云岩化层段碳同位素的值与现代海洋中碳酸盐岩沉积的碳同位素较为接近,恰好落入新近系全球海相碳酸盐岩的范围内^[53-54],在中新世全球普遍温度较低^[16],其恰恰处在南极冰盖扩张期。梅山组 27 件白云岩的氧同位素值在一定程度上高于上覆及下伏灰岩的氧同位素值,根据实验室模拟测定,每增加 1% 摩尔浓度的镁,其 $\delta^{18}\text{O(PDB)}$ 值增加

表 2 西沙地区西科 1 井梅山组不同层位碳、氧同位素值范围

Table 2 Range of carbon and oxygen isotope values at different units of the Meishan Formation in Well XiKe 1, Xisha Islands

白云岩层位	件数	$\delta^{13}\text{C(PDB)}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O(PDB)}/\text{‰}$
第 1 套厚层白云岩	10	2.626 ~ 3.051/2.789	2.293 ~ 4.619/3.484
第 2 套厚层白云岩	6	2.670 ~ 3.146/2.901	0.892 ~ 3.290/1.831
薄层白云岩	4	1.800 ~ 2.180/1.969	0.987 ~ 4.070/2.568
第 3 套厚层白云岩	7	2.167 ~ 2.340/2.228	2.173 ~ 3.303/2.603
灰岩	48	-4.788 ~ -2.951/0.959	-7.021 ~ -1.444/-2.110
灰质云岩	8	1.214 ~ 2.944/2.061	0.802 ~ 4.105/2.278
云质灰岩	6	1.546 ~ 2.034/1.777	-2.761 ~ -1.980/-0.339

注:表格中数据为最小值~最大值/平均值。

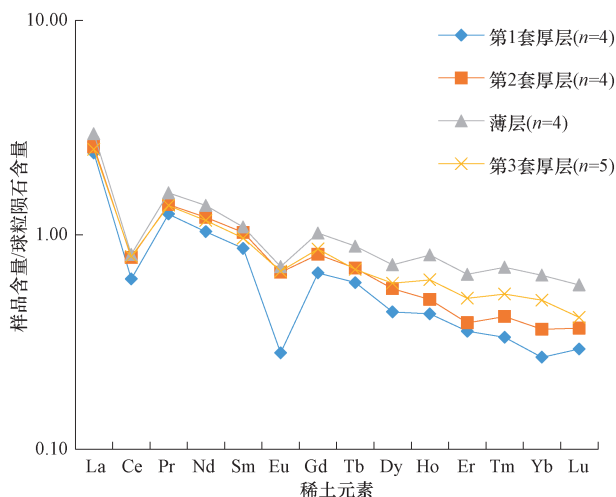


图6 经球状陨石标准化以后西科1井的白云岩平均稀土元素曲线

Fig. 6 Average REE curves of dolostones after normalization by globular vermiculite in Well XiKe 1

(第1套厚层白云岩数据来源于文献[12],其余数据来源于本文。)

大概0.05‰~0.14‰^[55-56],因此梅山组白云岩比灰岩的 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值高。

3.3.3 稀土元素

稀土元素在成岩过程及其他作用过程中有较好的“一致性”,使其受成岩作用的影响非常小^[57],因此可提供岩石成岩过程中的环境条件信息,进而可以分析岩石的成因^[16,58-60]。对于碳酸盐岩的成因方面主要研究流体稀土元素的含量及其模式,对沉积岩稀土元素研究可通过稀土元素含量及配分形式以获得其不同时代及物质来源信息。例如海水中的重稀土元素相对北美页岩(NASC)或太古宙页岩(PAAS)标准值较富集,而Ce表现出明显亏损,Eu弱亏损;稀土元素的金属性也较强,Ce和Eu的变价离子可用来判别沉积物沉积时所处的环境和成岩流体性质,氧化环境中Ce为负异常,低温碱性环境中则表现出Eu负异常^[61-62]。对梅山组白云岩稀土进行统计可见白云岩层有相似的趋势,其具有低Ce、低Eu的特征,将稀土元素标准化后作图(图6),显示出其主要为氧化环境低温碱性海水。

4 讨论

4.1 白云岩成因模式探讨

前人对西沙地区新生界白云岩成因研究包括:混合水成因藻礁白云岩作用^[63-64]、冰期浓缩水和后期岩

浆活动相关的热水作用^[65]、叠加了构造相关的热流体作用的渗透回流机制^[12,17,48]以及古气候的变化间接控制(可能是西科1井白云岩的重要形成原因)等^[13,39,61]。梅山组未发现与强蒸发相关的膏盐层,而其盐度略高于正常海水,表明其处于蒸发强度较弱的环境,白云石以粉晶-细晶为主,多为平直自形-半自形晶,部分层位发育不同程度的雾心亮边白云石,且在其孔隙中多有较大晶体的胶结物白云石沉淀,梅一段和梅二段均可见砂糖状白云岩,一般认为是渗透回流白云岩成因特征^[12,48,65-67]。梅山组碳酸盐岩碳、氧同位素值整体具有一定的相关性,但白云岩层的碳、氧同位素值却毫无相关性,说明大气淡水及有机质等流体没有参与相关白云岩化过程^[48]。梅山组白云岩层的碳、氧同位素均倾向于正值(图2,图5),均在不同程度上高于该层位附近的灰岩样品值,这与Fouke(1994)对中新世-上新世的加勒比海的岛屿白云岩研究是一致的。西科1井梅山组沉积时期处于全球相对较为寒冷时期^[52],古海洋温度降低会使氧同位素值增大,且从梅山组白云岩样品的氧同位素平均值与Budd(1997)对太平洋及加勒比海的岛礁白云岩研究中的氧同位素平均值较为接近。黄思静(2010)指出受大气淋滤的碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对较小,而蒸发海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对正常海水更大;Sibley(1990)认为沉积物中 $\delta^{18}\text{O}$ 值大于2‰便属于高于正常海水盐度的介质中,梅山组白云岩略高于其值,且在岩心中未见膏盐层,均显示白云化流体不可能是高浓度的卤水,而四层白云岩层中的Fe、Sr、Mn值十分接近,说明其 Mg^{2+} 有相同的来源,推测主要为微蒸发的海水提供镁离子的来源。

梅山组白云岩总体呈现出低Fe、低Mn、低Ce以及低Eu的特点,显示其形成环境属于氧化环境,这与罗威等(2018)提到的梅山组发育几次暴露面相吻合,在岩心上也观察到相关暴露信息,如第1、第2套厚层白云岩顶部暴露面附近岩石颜色呈褐棕色,发育有溶蚀现象。以上证据说明梅山组白云岩成因可能主要为渗透回流成因,但梅山组较厚层的白云岩厚度较黄流组 and 三亚组一段更薄,推测梅山组沉积时期,南海地区中新世干旱气候持续时间较为短暂,造成蒸发海水存在的时间短,渗透回流的白云化流体造成的白云岩层相对较薄。而梅山组薄层白云岩具有与厚层白云岩相似的地球化学特点(低Mn、低Fe、低Sr)说明其 Mg^{2+} 同样来源于海水,但灰岩原岩物理性质的差异性(灰岩的孔隙度、渗透率等),使得高镁流体沿渗透性好的灰岩(以及前期形成的白云岩)流动更通畅,影响

的距离更远,在白云岩化流体影响的远端位置出现指状下延的薄层白云岩(图7)。随深度的增加,回流的高镁流体的白云岩化能力逐渐减弱^[68-72],在继续向下流动的过程里,遇上红藻含量比较高的灰岩层,由于红藻更易白云岩化的特性^[35,73-74]而出现粉晶云岩(梅二段较为普遍),薄层白云岩之下,白云石交代灰岩不彻底,可能源于高镁流体流动的远端(下伏方向)白云化作用较弱。

梅山组白云岩下伏层位通常为灰质云岩或云质灰岩,可见较大晶形(粉晶-细晶)的白云石,且晶体干净明亮、自形程度较好、呈平直晶面,时志强等(2016)根据包裹体测温认为西科1井三亚组白云岩层受到新近纪地热增温的影响,推测该作用向上也或多或少影响了梅山组碳酸盐岩(图7),导致白云岩层中或邻近的灰质云岩(云质灰岩)中出现较多的白云石。相对高温条件下形成的白云石中解理发育,在地温降低时发育去白云化现象。

4.2 白云岩物性

西沙地区白云岩普遍呈现出高孔隙度、高渗透率的特点,渗透率的分布情况以及孔隙度的发育情况具有很好的分区性^[63,75]。经过对梅山组的141件样品其中包括60件白云岩样,81件灰岩样进行岩心孔渗数据测试。根据测试分析梅山组白云岩孔隙度分布在2.9%~40.6%,均值为24.2%;渗透率分布在 $0.05 \times 10^{-3} \sim 5\,651.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,均值为 $1\,043.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度和渗透率有一定的相关性(图8),相比来说,灰岩的孔、渗相关性强于白云岩(图8)。白云岩孔隙度普遍大于20%(图9a),渗透率普遍大于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

(图9b),且高孔隙度灰岩(孔隙度>30%)样品多于白云岩,但高渗(渗透率> $1\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)白云岩样品多于灰岩(图9),显示白云岩储层非均质性较强。按照碳酸盐岩储层的划分方案(SY/T6285—2011)可知道梅山组白云岩孔隙度、渗透率均比较好,主要表现为高孔、高渗的特点,其次为中孔隙度、中渗透率样品(图9),白云岩有潜力作为优质储集岩。

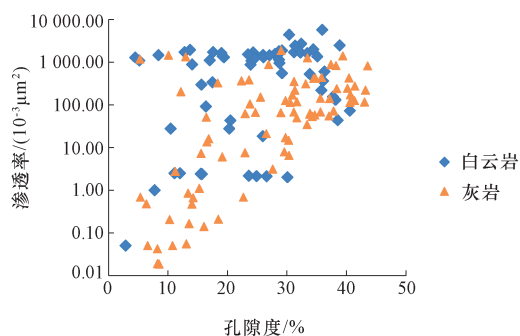


图8 西沙地区西科1井梅山组白云岩孔隙度与渗透率相关性

Fig.8 The correlation between porosity and permeability of dolostones in the Meishan Formation in Well XiKe 1, Xisha Islands

5 结论

1)西科1井梅山组白云岩颜色丰富(白色、灰白色、褐色和棕色等),厚层白云岩往往发育在古暴露面附近,红藻较为发育,薄层白云岩固结程度不高,且薄层白云岩多发育白云石化不彻底、去白云岩化现象。白云岩以粉晶-细晶平直面自形晶为主。

2)白云岩层具有低Sr、低Fe、低Mn、低Eu、低Ce的特征,表明其所处为氧化的海水环境,而其微量元素有相似的区间,说明其镁离子流体来源相似,白云岩氧同位素倾向于正值,可能由于白云岩化过程引起的。白云岩中碳同位素表明白云岩化过程中对原始灰岩中的碳的继承性,碳、氧同位素总体上指示白云石形成流体的性质为微蒸发浓缩的海水。

3)根据其宏观产出层段、微观白云石产出形态、碳、氧同位素数值及主微量元素的分析认为其可能以准同生期渗透回流白云岩化作用为主,薄层白云岩中较高的红藻含量使白云石化较易发生,形成更纯的粉晶云岩,且地热增温在此过程中起到了一定的作用。

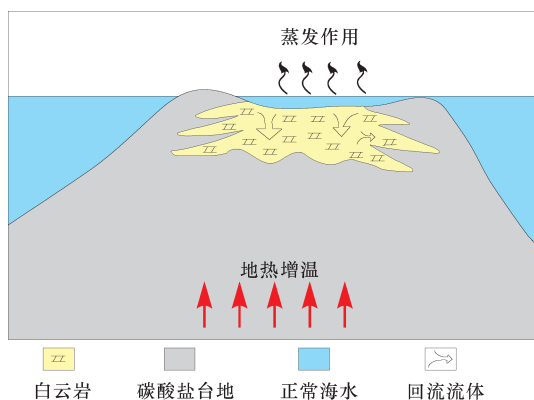


图7 西沙地区西科1井梅山组白云石化成因模式
(修改自文献[47])

Fig.7 Diagram of genetic mechanism of dolomitization of the Meishan Formation in Well XiKe 1, Xisha Islands
(modified from reference[47])

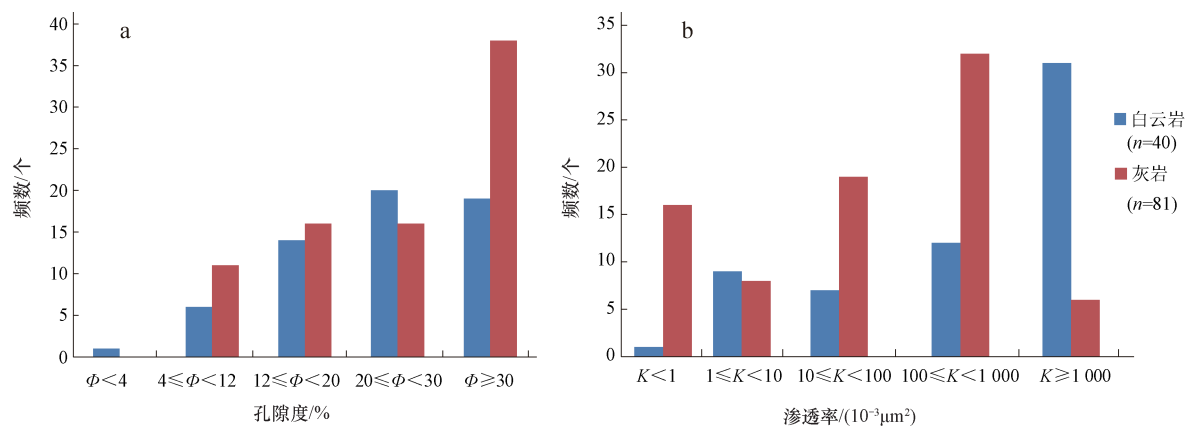


图 9 西沙地区西科 1 井梅山组不同岩石类型物性统计

Fig. 9 Statistical plot of physical properties of various rocks in the Meishan Formation in Well XiKe 1, Xisha Islands

a. 不同岩性孔隙度(Φ)分布直方图; b. 不同岩性渗透率(K)分布直方图

4) 梅山组白云岩层具有高孔隙度、高渗透率的特点, 具有作为优质储集岩的潜力。

参 考 文 献

- [1] Franke D, Savva D, Pubellier M, et al. The final rifting evolution in the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58: 704–720.
- [2] Li C F, Xu X, Lin J, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349 [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014, 15 (12): 4958–4983.
- [3] 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, 2006.
- Wei Xi. Forming condition of late-cenozoic reef facies carbonate rocks in Xisha Sea Area and their oil and gas exploration potential[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2006.
- [4] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin [J]. The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands; Part 2, 1983: 23–56.
- [5] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 1993, 98 (B4): 6299–6328.
- [6] Qiu X, Ye S, Wu S, et al. Crustal structure across the Xisha trough, northwestern South China Sea[J]. Tectonophysics, 2001, 341 (1–4): 179–193.
- [7] 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, 2010.
- Zhao Qiang. The Sedimentary research about reef carbonatite in Xisha Islands[D]. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [8] 张新元. 南海西北部陆缘中新世碳酸盐台地发育演化与生物礁识别研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016.
- Zhang Xinyuan. The evolution and characteristics of Miocene carbon-

ate platforms and reefs in the Xisha area, northwestern continental margin of the South China Sea [D]. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2016.

- [9] 孙启良, 马玉波, 赵强, 等. 南海北部生物礁碳酸盐岩成岩作用差异及其影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2008 (05): 665–672.
- Sun Qiliang, Ma Yubo, Zhao Qiang, et al. Different reef carbonate diagenesis and its influential factors, Northern South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2008 (05): 665–672.
- [10] 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: 中国地质大学学报, 2015, 40 (4): 677–687.
- Zhu Weilin, Wang Zhenfeng, Mi Lijun, et al. Sequence stratigraphic Xike-1 Well from framework and Xisha Islands reef growth unit of South China Sea [J]. Earth Science: Journal of China University of sciences, 2015, 40 (4): 677–687.
- [11] 魏喜, 贾承造, 孟卫工, 等. 南海西沙海域西琛 1 井生物礁的性质及岩石学特征[J]. 地质通报, 2008, 27 (11): 1933–1938.
- Wei Xi, Jia Chen Zhao, Meng Weigong, et al. Biogenetic reefs and its petrological characteristics of well Xichen 1, Xisha sea area, China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (11): 1933–1938.
- [12] 王振峰, 时志强, 张道军, 等. 西沙群岛西科 1 井中新统–上新统白云岩微观特征及成因[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2015, 40 (4): 633–644.
- Wang Zhenfeng, Shi Zhiqiang, Zhang Daojun, et al. Microscopic features and genesis formiocene to pliocene dolomite in Well Xike-1, Xisha Islands [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2015, 40 (4): 633–644.
- [13] 曹佳琪, 张道军, 翟世奎, 等. 西沙岛礁白云岩化特征与成因模式分析[J]. 海洋学报, 2016, 38 (11): 125–139.
- Cao Jiaqi, Zhang Daojun, Zhai Shikui, et al. The characteristics and genetic modil dolomitization in Xisha Reef Islands [J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38 (11): 125–139.

2015, 40 (4): 677–687.

- [14] 许红,王玉净,蔡峰,等.西沙中新世生物地层和藻类的造礁作用与生物礁演变特征[M].北京:科学出版社,1989,1-134
- Xu Hong, Wang Yujing, Cai Feng, et al. Reef-forming effects and bioreef evolution characteristics of the Miocene biostratigraphy and algae in Xisha[M]. Beijing: Science Press, 1989, 1-134
- [15] 何起祥,张明书,业治铮,等.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[J].海洋地质与第四纪地质,1986,6(3):1-8.
- He Qixiang, Zhang Mingshu, Ye Zhi zheng, et al. Stable isotope stratigraphy of late Pleistocene carbonate deposits in Shidao, Xisha Islands[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1986, 6(3): 1-8.
- [16] 修淳,张道军,翟世奎,等.西沙石岛礁相白云岩稀土元素地球化学特征及成岩环境分析[J].海洋通报,2017,36(2):151-159.
- Xiu Chun, Zhang Daojun, Zhai Shikui, et al. Geochemical characteristics and diagenetic environment analysis of rare earth elements in dolomite of Xisha Shidao[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(2): 151-159.
- [17] Bi D J, Zhai S K, Zhang D J, et al. Constraints of fluid inclusions and C, O isotopic compositions on the origin of the dolomites in the Xisha Islands, South China Sea[J]. Chemical Geology, 2018, 493: 504-517.
- [18] Wang R, Yu K, Jones B, et al. Evolution and development of Miocene "island dolostones" on Xisha Islands, South China Sea[J]. Marine Geology, 2018, 406: 142-158.
- [19] 冯文科,鲍才旺.南海地形地貌特征[J].海洋地质研究,1982,2(4):80-93.
- Feng Wenke, Bao Caiwang. Topographical features of the South China Sea[J]. Journal of Marine Geology, 1982, 2(4): 80-93.
- [20] 高红芳,陈玲.南海西部中建南盆地构造格架及形成机制分析[D].2006.
- Gao Hongfang, Chen Ling. Analysis of tectonic framework and formation mechanism of the Zhongjiannan Basin in the western South China Sea[D]. 2006.
- [21] 张庆,朱玉双,张金功,等.南海北部莺-琼盆地隐蔽圈闭类型与形成条件及勘探前景[J].海洋地质与第四纪地质,2014,34(2):111-120.
- Zhang Qing, Zhu Yushuang, Zhang Jingong, et al. Types and formation conditions and exploration prospects of concealed traps in the Qiongzhusi Basin in the northern South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2014, 34(2): 111-120.
- [22] 徐子英,汪俊,高红芳,等.南海海盆中南—礼乐断裂带研究进展[J].热带海洋学报,2019,38(2):86-94.
- Xu Ziyang, Wang Jun, Gao Hongfang, et al. Research progress of the Zhongnan-Liyue fault zone in the South China Sea Basin[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2019, 38(2): 86-94.
- [23] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 20(4): 353-431.
- [24] 王龙樟,姚永坚,张莉,等.中中新世以来南海南部前隆的迁移:来自北康盆地的证据[J].石油与天然气地质,2019,40(1):123-132.
- Wang Longzhang, Yao Yongjian, Zhang Li, et al. Forebulge migration since the Mid-Miocene in the southern South China Sea: Evidences from the Beikang Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 123-132.
- [25] Metcalfe I. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66: 1-33.
- [26] Nissen S S, Hayes D E, Bochu Y, et al. Gravity, heat flow, and seismic constraints on the processes of crustal extension: Northern margin of the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1995, 100(B11): 22447-22483.
- [27] 周蒂,吴世敏,陈汉宗.南沙海区及邻区构造演化动力学的若干问题[J].大地构造与成矿学,2005,29(3):339-345.
- Zhou Di, Wu Shimin, Chen Hanzong. Some problems the tectonic evolution of Nansha and its adjacent regions in Southern South China Sea[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2005, 29(3): 339-345.
- [28] Bai Y, Wu S, Liu Z, et al. Full-fit reconstruction of the South China Sea conjugate margins[J]. Tectonophysics, 2015, 661: 121-135.
- [29] 谢锦龙,余和中,唐良民,等.南海新生代沉积基底性质和盆地类型[J].海相油气地质,2010,15(04):35-47.
- Xie Jinlong, Yu Hezhong, Tang Liangmin, et al. The basement features and basin types of Cenozoic sedimentary in the south China Sea[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(04): 35-47.
- [30] 刘雨晴,吴智平,张杰,等.南海南部陆缘盆地反转构造及其油气成藏意义:以礼乐盆地北部坳陷为例[J].断块油气田,2018,25(1):1-5.
- Liu Yuqing, Wu Zhiping, Zhang Jie, et al. Characteristics of inversion tectonic and its impact on hydrocarbon accumulation in southern continental basins of South China Sea: A case study of northern Depression, Reed Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(1): 1-5.
- [31] 孙晓猛,张旭庆,张功成,等.南海北部新生代盆地基底结构及构造属性[J].中国科学:地球科学,2014,44(06):1312-1323.
- Sun Xiaomeng, Zhang Xuqin, Zhang Gongchen, et al. Texture and tectonic attribute of Cenozoic basin basement in the northern South China Sea[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(06): 1312-1323.
- [32] 雷超,任建业,张静.南海构造变形分区及成盆过程[J].地球科学(中国地质大学学报),2015,40(4):744-762.
- Lei Chao, Ren Jianye, Zhang Jing. Tectonic province divisions in the south China Sea: Implications for basin geodynamics[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2015, 40(4): 744-762.
- [33] 张建勇,郭庆新,寿建峰,等.新近纪海平面变化对白云石化的控制及对古老层系白云岩成因的启示[J].海相油气地质,2013,18(4):46-12.
- Zhang Jianyong, Guo Qingxin, Shou Jianfeng, et al. Control of the neogene global eustasy on dolomitization: revelation to the origin of dolomitization in paleostrata[J]. Marine Origin Petroleum Geology,

- 2013,18(4):46-12.
- [34] 吕彩丽.南沙海区新生代碳酸盐岩台地形成演化及油气意义[D].中国科学院研究生院(海洋研究所),2012.
Lu Caili. Geological evolution and hydrocarbon potential of cenozoic carbonate platforms, Southern South China Sea[D]. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences(Marine Institute), 2012.
- [35] Wang Z, Huang K, Zhang D, et al. Maturation of neogene dolomite from xuande atoll of Xisha archipelago, the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 92:51-64.
- [36] 朱袁智, 钟晋樑. 西沙石岛和海南岛砂丘岩初探[J]. 热带海洋, 1984, 3(3):64-72.
Zhu Yuanzhi, Zhong Jinliang. A preliminary study on sand hilly rocks in Xisha Island and Hainan Island[J]. Tropical Ocean, 1984, 3(3):64-72.
- [37] 孙志鹏, 尤丽, 李晓, 等. 西沙西科1井第四系生物礁-碳酸盐岩的岩石学特征[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2015, 40(4):653-659.
Sun Zhipeng, you Li, Li Xiao, et al. Petrological characteristics of Quaternary reef-carbonate rocks in well Xisha 1[J]. Earth Science: Journal of the Chinese University of Geosciences, 2015, 40(4):653-659.
- [38] 张道军, 刘新宇, 王亚辉, 等. 西沙地区晚中新世以来碳酸盐岩的沉积演化及储层特征[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2015, 40(4):606-614.
Zhang Daojun, Liu Xinyu, Wang Yahui, et al. Sedimentary evolution and reservoir characteristics of carbonate rocks since the Late Miocene in Xisha area of South China Sea[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(4):606-614.
- [39] 解习农, 谢玉红, 李绪深, 等. 南海西科1井碳酸盐岩生物礁储层沉积学·层序地层与沉积演化[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2016. 12, P1-20
XieXinong, XieYuhong, Li Xushen et al. Sedimentary sequence stratigraphy and sedimentary evolution of carbonate reef reservoir in well Xike 1, South China Sea[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2016. 12, P1-20
- [40] 业治铮, 张明书, 韩春瑞, 等. 西沙石岛风成石灰岩和化石土壤的发现及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1984, 4(1):1-10.
Ye Zhizheng, Zhang Ming, Han Chunrui, et al. Discovery and significance of eolian limestone and fossil soils in Xisha Island[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1984, 4(1):1-10.
- [41] Ma Z L, Li Q Y, Liu X Y, et al. Palaeoenvironmental significance of miocene larger benthic foraminifera from the Xisha Islands, South China Sea[J]. Palaeoworld, 2018, 27(1):145-157.
- [42] 冯伟民, 余汶. 西沙群岛石岛晚更新世碳酸盐土壤层陆栖蜗牛化石[D]. 1991(03):69-74+131-132.
FengWeimin, Yu Wen. Terrestrial snail fossils from late Pleistocene carbonate soil layer in Shidao, Xisha Islands[D]. 1991(03):69-74+131-132.
- [43] 祝幼华, 刘新宇, 马瑞芳, 等. 南海西沙群岛西科1井早中新世-第四纪生物礁地层中钙质超微化石的发现及其意义[J]. 古生物学报, 2016, 55(3):385-392.
Zhu Youhua, Liu Xinyu, Ma Ruifang, et al. Early miocene quaternary calcareous Nanno fossils from the biogenetic reef complexes and their significance of Well, XK1, Xisha Islands, South China Sea[J]. Journal of Palaeontology, 2016, 55(3):385/392.
- [44] Shao L, Cui Y, Qiao P, 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.
- [45] 乔培军, 朱伟林, 邵磊, 等. 西沙群岛西科1井碳酸盐岩稳定同位素地层学[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2015, 40(4):725-732.
Qiao Peijun, Zhu Weilin, Shao Lei, et al. Carbonate stable isotope stratigraphy of Well Xike 1, Xisha Islands[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(4):725-732.
- [46] 邵磊, 朱伟林, 邓成龙, 等. 南海西科1井碳酸盐岩生物礁储层沉积学·年代地层与谷海洋环境[M]. 中国地质大学出版社, 2016. 12, P5
Shao Lei, Zhu Weilin, Deng Chenglong et al. Sedimentology of carbonate rock reef reservoirs in Well Xike 1 in the South China Sea · Geochronology and Valley Marine Environment[M]. China University of Geosciences Press, 2016. 12, P5
- [47] 高福红, 张永胜, 蒲秀刚, 等. 白云岩化作用类型及机理——以歧口凹陷古近系沙河街组一段为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(02):355-369.
GaoFuhong, Zhang Yongsheng, PuXiugang, et al. Types and mechanisms of dolomitization: a case study of the Paleogene Es¹ in Qikou sag [J]. 2017, 47(02):355-369.
- [48] 时志强, 谢玉红, 刘立, 等. 南海西科1井碳酸盐岩生物礁储层沉积学·储层特征与成岩演化[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2016. 12, P1-20
Shi Zhiqiang, Xie Yuhong, Liu Li et al. Sedimentology, reservoir characteristics and diagenetic evolution of carbonate bioplastic reservoirs in Xike 1 well, Nanhai[M]. China University of Geosciences Press, 2016. 12, P1-20
- [49] 孙海涛, 张玉银, 柳慧林, 等. 四川盆地东部下寒武统龙王庙组白云岩类型及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2):318-329.
Sun Haitao, Zhang Yuyin, Liu Huilin, et al. Typological analysis and genetic mechanism of dolomite in the lower Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2):318-329.
- [50] Tucker M E, Wright V P. Carbonate sedimentology[M]. John Wiley & Sons, 2009.
- [51] Vahrenkamp V C, Swart P K. Late Cenozoic dolomites of the Bahamas; metastable analogues for the genesis of ancient platform dolomites[J]. Dolomites: A volume in honour of Dolomie, 1994, 21:133-153.
- [52] 黄思静编著. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京:地质出版社, 2010.
Huang Sijing. Diagenesis of carbonate rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [53] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1964, 28(10-11):1787-1816.
- [54] Budd D A. Cenozoic dolomites of carbonate islands: their attributes and origin[J]. Earth-Science Reviews, 1997, 42:1-47.
- [55] Fritz P, Smith D. The isotopic composition of secondary dolomites

- [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1970, 34(11): 1161–1173.
- [56] Chacko T, Deines P. Theoretical calculation of oxygen isotope fractionation factors in carbonate systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(15): 3642–3660.
- [57] 强子同. 碳酸盐岩储层地质学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2007
- Qiang Zitong. Carbonate reservoir geology[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2007
- [58] 杨守业, 李从先. REE 示踪沉积物源研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(2): 164–167.
- Yang Shouye, Li Congxian. Research Progress of REE Tracer Sediment Sources[J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(2): 164–167.
- [59] 赵晓辰, 刘池洋, 赵岩, 等. 鄂尔多斯西南缘水泉岭组碳酸盐岩地球化学特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2017(2017年01): 101–109.
- Zhao Xiaochen, Liu Chiyang, Zhao Yan, et al. Geochemical characteristics of the carbonate rocks of the Shuiquanling Formation in the southwestern margin of Ordos[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science)*, 2017(2017–01): 101–109.
- [60] 曹婷婷, 徐思煌, 王约. 川东北下寒武统筇竹寺组稀土元素特征及其地质意义: 以南江杨坝剖面为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(5): 716–723.
- Cao Tingting, Xu Sihuang, Wang Yue. Characteristics of rare earth elements in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northeastern Sichuan Basin and its geological implications: a case study of Yangba section, Nanjiang[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(5): 716–723.
- [61] 雷国良, 王长生, 钱志鑫, 等. 贵州岩溶沉积物稀土元素地球化学研究[J]. 矿物学报, 1994, 14(3): 298–308.
- Lei Guoliang, Wang Changsheng, Qian Zhixin, etc. Geochemistry of rare earth elements in Karst sediments of Guizhou[J]. *Journal of Mineralogy*, 1994, 14(3): 298–308.
- [62] 郑荣才, 胡忠贵, 冯青平, 等. 川东北地区长兴组白云岩储层的成因研究[J]. 矿物岩石, 2007, 27(4): 78–84.
- Zheng Rongcai, Hu Zhonggui, Feng Qingping, et al. Genesis of dolomite reservoir of the Changxing Formation of upper Permian, northeast Sichuan[J]. *Journal of Mineral and Petrology*, 2007, 27(4): 78–84.
- [63] 张海洋, 许红, 卢树参, 等. 西沙中新世藻礁白云岩储层特征及成因模式[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(3): 48–56.
- Zhang Haiyang, Xu Hong, Lu Shushen, et al. Reservoir characteristics and genetic model of the Miocene algae reef dolomite in Xisha Islands[J]. *Journal of Ocean Geology*, 2016, 32(3): 48–56.
- [64] He Q X, Zhang M S. Origin of Neogene dolomites in Xisha Islands and their significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1990, 10(2): 45–55.
- [65] 魏喜, 贾承造, 孟卫工. 西沙群岛西琛1井碳酸盐岩白云石化特征及成因机制[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(2): 217–224.
- Wei Xi, Jia Chengzao, Meng Weigong. Dolomitization characteristics of carbonate rock in Xisha Islands and its formation: A case study of Well Xichen-1[J]. *Journal of Jilin University: Earth Sciences*, 2008, 38(2): 217–224.
- [66] Li R, Qiao P, Cui Y, et al. Composition and diagenesis of Pleistocene aeolianites at Shidao, Xisha Islands: Implications for palaeoceanography and palaeoclimate during the last glacial period[J]. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2018, 490: 604–616.
- [67] 王琼仙, 宋晓波, 陈洪德, 等. 川西龙门山前雷口坡组四段白云岩储层胶结物对早期孔隙的影响[J]. 石油实验地质, 2018, 40(6): 757–763.
- Wang Qiongxiang, Song Xiaobo, Chen Hongde, et al. Cement characteristics and effects on dolomite reservoir pores in the fourth member of Leikoupo Formation, Longmen Mountain front, western Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(6): 757–763.
- [68] Fouke B W. Deposition, diagenesis and dolomitization of Neogene Seroe Domi Formation coral reef limestones on Curaçao, Netherlands Antilles[M]. Publications Foundation for Scientific Research in the Caribbean Region, Amsterdam, 1994, 133, 182 pp.
- [69] Sibley D F. Unstable to stable transformations during dolomitization[J]. *The Journal of Geology*, 1990, 98(5): 739–748.
- [70] 罗威, 张道军, 刘新宇, 等. 西沙地区西科1井综合地层学研究[J]. 地层学杂志, 2018, 42(04): 485–498.
- Luo Wei, Zhang Daojun, Liu Xinyu, et al. Study on comprehensive stratigraphy of Xike 1 well in Xisha area[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2018, 42(04): 485–498.
- [71] Machel H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 235(1): 7–63.
- [72] Saller A H, Henderson N. Distribution of porosity and permeability in platform dolomite: Insight from the permian of west texas: Reply[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85: 530–532.
- [73] 张静, 张宝民, 单秀琴. 中国中西部盆地海相白云岩主要形成机制与模式[J]. 地质通报, 2017, 36(4): 664–675.
- Zhang Jin, Zhang Bao Min, Shan Xiu Qin. Major formation mechanisms and models of marine dolomite in middle and western basins of China. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(4): 664–675
- [74] 赵宗举, 潘文庆, 张宝民, 等. 塔里木盆地碳酸盐岩沉积储层特征及油气勘探目标优选—塔里木盆地寒武—奥陶系碳酸盐岩沉积储层研究[M]. 中国石油塔里木油田分公司, 2008.
- Zhao Zongju, Pan Wenqing, Zhang Baomin, et al. Characteristics of carbonate reservoirs and optimization of oil and gas exploration targets in the Tarim Basin—Study on the Cambrian-Ordovician carbonate rocks in the Tarim Basin[M]. PetroChina Tarim Oilfield Company, 2008.
- [75] 陈亦寒, 刘大锰, 魏喜, 等. 西沙群岛晚新生代生物礁储层特征及控制因素—基于西琛1井钻探资料[J]. 石油天然气学报, 2007(3): 113.
- Chen Yihan, Liu Dayang, Wei Xi, et al. Characteristics and controlling factors of the Late Cenozoic reef reservoirs in the Xisha Islands: based on the drilling data of Xiqiao 1 well[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007(3): 113.