

董刚, 刘新宇, 李绪深, 等. 南海西科 1 井致密白云岩特征及成岩环境[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(6): 49-54.

南海西科 1 井致密白云岩特征及成岩环境

董刚^{1,2}, 刘新宇³, 李绪深³, 张道军³, 闫桂京^{1,2}, 苏大鹏^{1,2}, 许红^{1,2,4*}

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071; 3 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057; 4 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061)

摘要:西科 1 井为南海区域揭示生物礁地层最全、取心最为完整的钻井。该井下中新统三亚组发育致密白云岩,其孔隙度为 1.65%~16.4%,平均 6.7%。渗透率极低,局部渗透率仅为 $(11.8\sim39)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均渗透率 $<1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。利用沉积岩石学、岩石孔渗物性特征和包裹体测试方法,分析了致密白云岩的成岩特征,讨论了其成岩演化条件。致密白云岩中的白云石以粉晶、细晶和泥晶为主,形态多为自形和半自形,晶形较好,具有雾心亮边构造,白云石晶体接触紧密。晶间孔细小,孔隙呈分隔状且互不连通,次生溶蚀孔不发育。三亚组致密白云岩形成于准同生成岩阶段和后生成岩阶段。频繁的海平面变化和沉积物暴露,导致多期的海水充注孔隙作用,加上高温高盐的古海洋和地层环境,为致密白云岩的形成创造了条件。

关键词:西科 1 井; 致密白云岩; 岩石特征; 成岩环境

中图分类号:P744.4; P588

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.045

0 引言

碳酸盐岩油气藏是油气勘探的热点。生物礁是碳酸盐岩储层中的重要部分^[1]。西沙群岛广泛发育新近系生物礁滩体系,对研究南海新生代生物礁沉积及礁相储层具有重要价值。目前有关南海生物礁的研究总体还是基于有限的地震资料和少数几个钻孔^[2]。已有的钻孔位置主要位于西沙群岛的永乐环礁和宣德环礁上。西探 1 井是“七五”期间青岛海洋地质研究所设计,位于永乐环礁琛航岛上钻探时间较早的一口全取心井(完钻井深 802.17 m,完钻层位下中新统)^[3],围绕该井的研究延续了 20 多年。“十二五”期间,因为深水油气勘探的需要,油气重大专项批准实施了钻穿西沙群岛生物礁工程,在西沙群岛石岛钻探了西科 1 井,揭露生物礁相 1 257.52 m(完钻井深 1 268.02 m)^[2,4-7](图 1)。

利用岩石矿物学、地球化学等方法,迄今已经对 2 口钻井的生物礁地层特征、沉积特征和成岩特征等进行了研究和对比^[2-3]。同时,在西沙群岛新近纪地层中发现了白云岩,并先后近进行了系列研究^[8-9]。

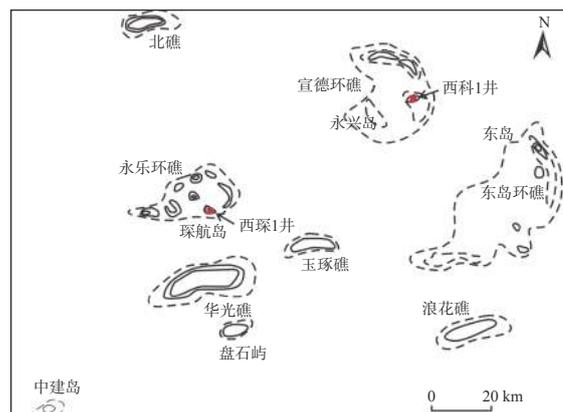


图 1 西科 1 井位置图

Fig.1 Location of well Xike 1

白云岩因具有良好的储集特性可作为油气储层,是油气储层研究的热点^[10],白云岩研究对认识勘探区域的碳酸盐成岩特征和发育规律具有重要意义。我国四川盆地和塔里木盆地的下古生代白云岩储层中均有好的油气发现^[11-14]。而致密白云岩在油气勘探中一般作为非常规油气储层,具有低孔和低渗的特点^[15]。西沙地区新近系发育的白云

收稿日期: 2021-02-26

资助项目: 国家自然科学基金(41872114); 国家科技基础资源调查专项课题(2017FY201407)

作者简介: 董刚(1983—),男,硕士,助理研究员,主要从事海洋地质相关研究工作. E-mail: donggang02@163.com

* 通讯作者: 许红(1957—),男,博士,研究员,主要从事油气地质调查与资源勘探评价及海洋生物礁成因研究工作. E-mail: xuhong8320@163.com

岩集中于中新世—上新世和生物礁有关的沉积层中^[3, 8, 16]。基于岩石学、地球化学等手段,西科1井1 000 m以上井段已经进行了较深入的碳酸盐岩研究,研究表明该深度段的碳酸盐岩,无论是石灰岩还是白云岩,均具有较好的孔渗特征和油气储集性能,未发现致密白云岩。而1 000 m以下的白云岩特性研究相对较少^[17]。西沙地区致密白云岩首先发现于油气重大专项的第1批测试数据并见于相关工作报告和会议^[4-5];2019年,《中国地质》英文版就该发现进行了报道^[17]。在此基础上,本文利用沉积岩石学、岩石孔渗物性特征和包裹体等技术方法,分析了西科1井下中新统三亚组白云岩的成岩特征,并对其成岩环境进行了探讨。

1 材料和方法

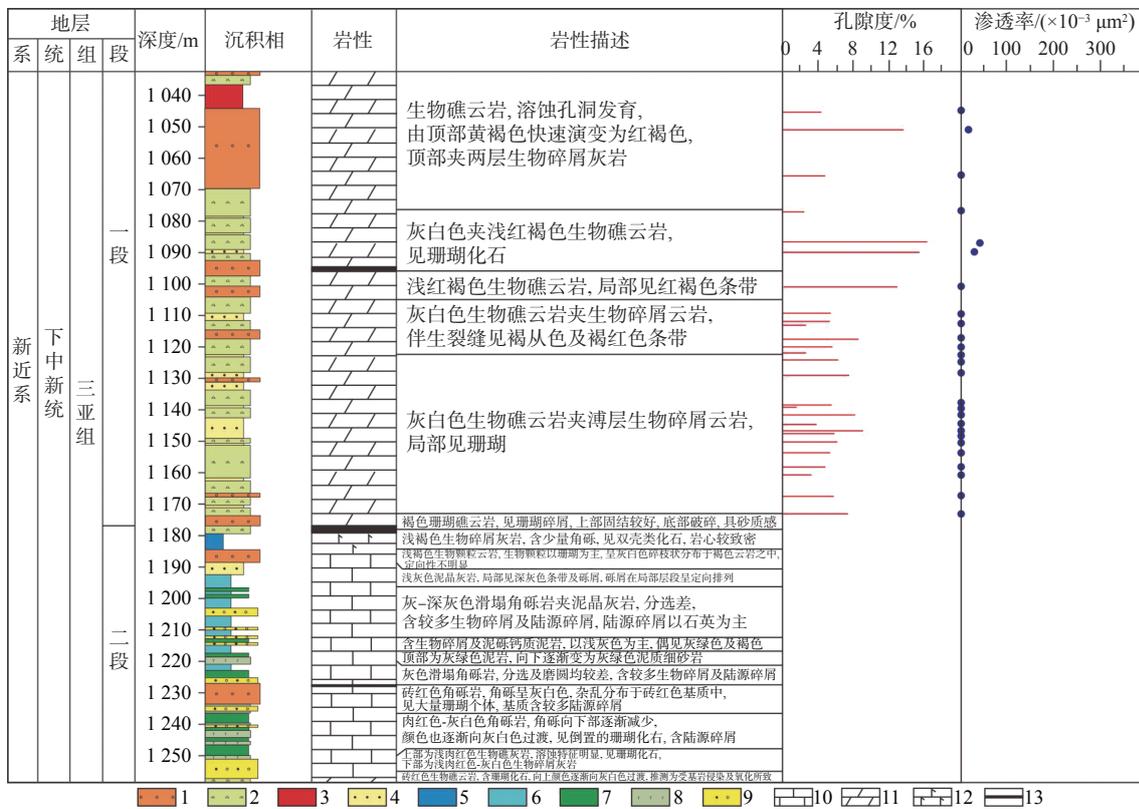
本文样品涉及2014年先后采集到的西科1井三亚组27件样品,对其进行了岩石孔渗物性测试。对2个典型深度的岩石样品磨制铸体薄片,并利用Nikon LV100POL偏光显微镜进行了镜下鉴定和照

相,同时,利用了湛江分公司合作者完成的36件样品的流体包裹体测试数据。其中岩石孔渗物性由中国石油大学地球科学学院应用地球物理实验室测定,利用的是缩微岩心物性国家发明专利相关技术。流体包裹体由成都理工大学测定,使用的标准为:EJ/T 1105—1999(矿物流体包裹体温度的测定)。三亚组的沉积相和成岩特征则是根据已有的研究成果资料汇总整理而成^[2, 7, 18]。

2 结果

2.1 沉积相和岩性特征

西沙群岛具有3套白云岩,分别位于在下中新统上部、中—上中新统和上新统^[3, 19]。下中新统三亚组主要为一套在白垩系花岗岩麻岩基底上发育起来的孤立台地边缘建造的生物礁滩沉积体系^[2],其上与梅山组的分界面为典型的风化暴露面,显示经历了较长时间的沉积间断。三亚组一段和二段的沉积相和岩性存在较大的差别(图2)。三亚组二



1. 礁盖; 2. 藻黏结岩礁核; 3. 粒屑滩; 4. 礁后内侧滩; 5. 潟湖; 6. 孤立碳酸盐岩台地; 7. 礁沟; 8. 珊瑚骨架岩礁核; 9. 混合碎屑滩; 10. 石灰岩; 11. 白云岩; 12. 云灰岩; 13. 间断面

图2 西科1井三亚组沉积相和岩性剖面图

Fig.2 Sedimentary facies and lithologic profile of Sanya Formation in well Xike 1

段沉积相以潟湖、孤立碳酸盐台地沉积、礁沟、珊瑚骨架岩礁核和碎屑滩等沉积相为主, 沉积物以由生屑、石英颗粒构成的混合碎屑滩沉积为主。三亚组一段主要发育礁盖、藻黏结岩礁核和粒屑滩等沉积相, 该段是三亚组的主要造礁期。在岩石类型上, 三亚组二段主要以石灰岩为主, 顶部和底部均存在薄层的白云岩。三亚组一段岩石绝大多数遭受白云化, 部分层段已经完全白云岩化。同时, 三亚组存在多个沉积间断面, 间断面附近的岩性出现较多红色、褐色及红褐色等氧化色。上述沉积相和岩性特征反映出当时沉积环境发生过多次较为剧烈的变化。

2.2 孔渗物性特征

三亚组的孔渗物性测定主要针对上段的白云岩层段(图 2), 测试结果显示, 三亚组上段的孔隙度为 1.65%~16.4%, 平均 6.7%。渗透率仅有 3 个位置测得结果, 分布范围为 $(11.8\sim 39)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均渗透率 $< 1\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 渗透率极低。

显微镜下薄片鉴定结果显示(图 3), 三亚组上段白云岩中的白云石以粉晶、细晶和泥晶为主, 形态多为自形和半自形, 晶形较好, 单个晶体有较明显的雾心亮边构造, 白云石晶体接触紧密。孔隙以晶间孔为主, 孔隙细小呈分隔状, 互不连通, 次生溶蚀孔不发育。测试鉴定结果显示该层段的物性总体较差, 属于致密白云岩。

2.3 流体包裹体

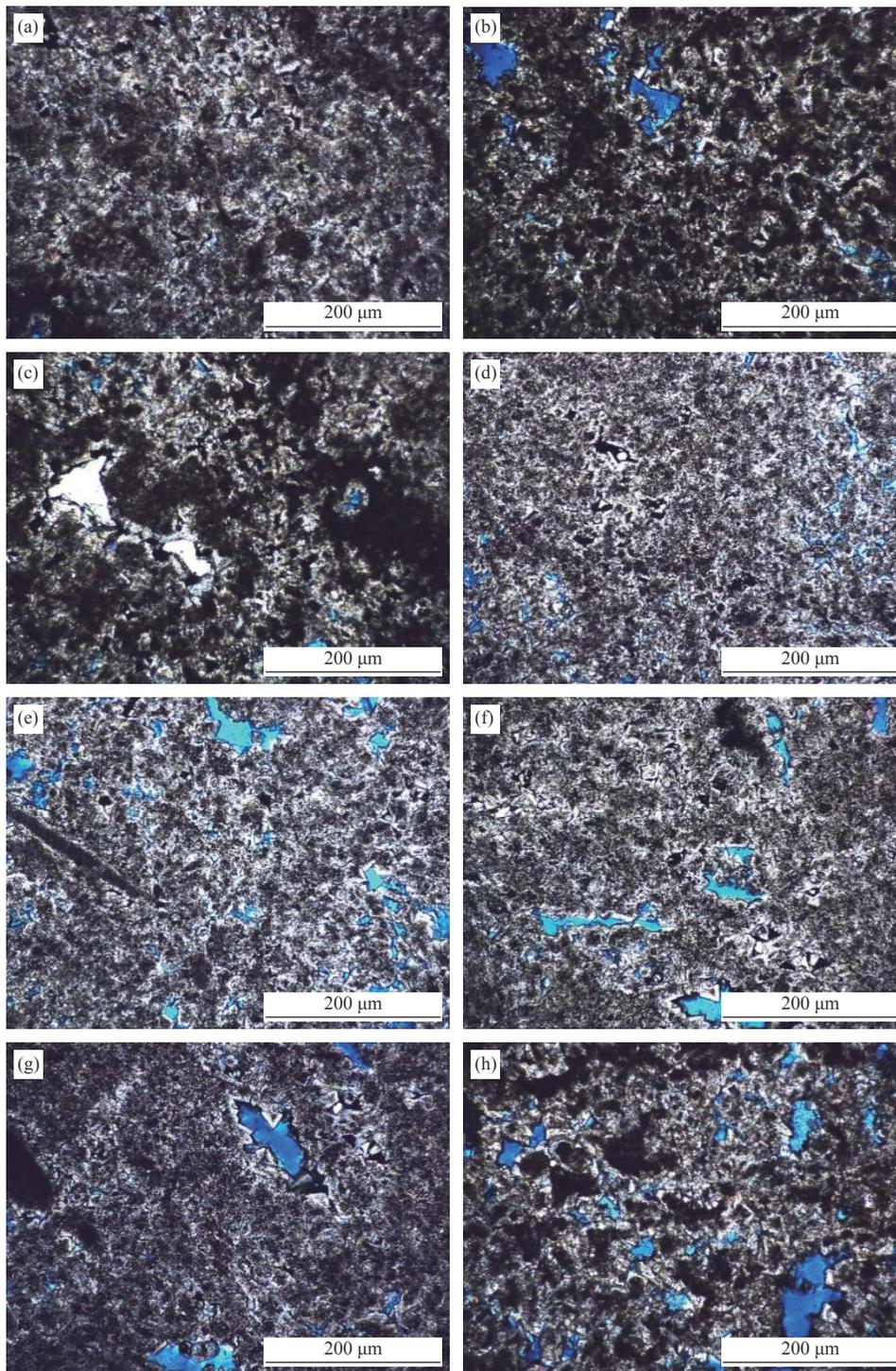
通过对三亚组白云岩中白云石气液包裹体的测定, 获得包裹体的均一温度和冰点温度, 计算出包裹体的盐度和模拟深度(表 1)。三亚组上段的包裹体主要分为原生和次生 2 种产状, 原生包裹体分布在白云岩主体矿物中的白云石晶体内, 次生包裹体主要分布于孔隙或裂缝中的白云石中及白云石晶体中的裂隙中。结果显示, 包裹体的均一温度为 $130.8\sim 210.0\text{ }^\circ\text{C}$, 平均 $177.2\text{ }^\circ\text{C}$; 冰点温度为 $-20.4\sim -8.2\text{ }^\circ\text{C}$, 平均 $-14\text{ }^\circ\text{C}$; 计算得到的盐度为 $12\%\sim 22.5\%$, 平均为 17.5% , 模拟深度为 $1.13\sim 1.98\text{ km}$, 平均 1.72 km 。

3 讨论

准同生成岩阶段和后生成岩阶段均可形成白云岩。白云岩的形成发育与准同生成岩阶段早期

沉积物所处的沉积环境和后生成岩阶段的地质作用有密切的关系。从沉积相和岩性剖面看, 三亚组是在白垩系花岗片麻岩基底上发育起来的一套生物礁滩沉积体系, 三亚组与上覆梅山组之间存在一个明显的沉积间断暴露面, 在三亚组内部也发育多个暴露面。暴露面之下岩性主要以棕黄色、红褐色的生物礁云岩和云灰岩为主。暴露面的出现反映了当时沉积环境和海平面发生了较为剧烈的变化。海平面的变化与气候条件密切相关, 据许红等^[20]研究, 在早中新世, 古气候经历了温暖—寒冷 2 次旋回变化。反复的水深变化和沉积物暴露能够使白云岩化流体分多期次进入先前沉积物的孔隙中, 促进白云岩化作用发生, 并不断的阻塞岩石中的孔隙和喉道, 为准同生成岩阶段致密白云岩的形成提供了物质基础。魏喜等^[3]利用西琛 1 井中新统白云岩的碳氧同位素测定结果计算得到的准同生阶段白云岩形成时的海水盐度 36.88% , 明显高于正常的海水盐度。由于西琛 1 井和西科 1 井同属于西沙群岛, 2 口井的距离很近, 据此推断西科 1 井及整个西沙群岛附近在下中新世应属于一个局部范围内的超浓缩海水环境。中新世南极冰盖形成引起全球海退事件^[21], 因此极致的超浓缩海水环境可能与全球海平面的降低和局部封闭环境中水体的蒸发密切相关, 而这种环境也有利于准同生期白云岩的形成。

西琛 1 井中新统白云岩中包裹体的测定结果显示, 其白云岩埋藏成岩流体盐度平均为 4.55% , 温度为 $72.8\text{ }^\circ\text{C}$ ^[3]。本次研究测得西科 1 井三亚组白云岩中包裹体的埋藏成岩流体盐度平均 17.5% , 温度为 $130.8\sim 210.0\text{ }^\circ\text{C}$, 平均 $177.2\text{ }^\circ\text{C}$, 明显高于西琛 1 井的测定结果。根据静岩压力梯度计算的流体包裹体捕获深度为 $1.13\sim 1.98\text{ km}$, 平均 1.72 km , 比白云岩样品的现有深度要深得多, 根据以上数据推测后生成岩阶段白云岩形成时的地层温度要远高于正常的地层温度, 西沙群岛附近区域在下中新世应属于一个极高地温梯度的地层环境。地层的这种异常高温可能与西沙地区的火山和岩浆活动有关。地震剖面揭示西沙群岛附近海域浅层侵入或喷出海底的火山岩十分普遍^[3], 具备使地层温度升高的热源。而且高温是白云石形成的必要热力学条件^[22-23], 研究发现西科 1 井中随深度的增加白云石在岩石中的比重增加^[2, 16], 可能与地层深部的异常高温有关。因此, 极高的地层温度加上高盐度的地层流体, 是促进后生成岩阶段白云岩形成的重要因素。



a-d. 粉晶—细晶白云岩, 晶体以自形晶半自形晶为主, 具雾心亮边(1 045 m, 铸体薄片, 单偏光);
e-h. 粉晶—细晶白云岩, 晶体以自形晶半自形晶为主, 具雾心亮边(1 064.64 m, 铸体薄片, 单偏光)

图3 西科1井三亚组白云岩显微特征

Fig.3 Microscopic characteristics of dolomite in Sanya Formation of well Xike 1

4 结论

(1)南海西科1井下中新统三亚组上段白云岩层段中,孔隙度为1.65%~16.4%,平均6.7%。渗透

率仅有3个位置测得结果,渗透率极低,局部渗透率仅为 $(11.8\sim39)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均渗透率 $<1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。白云岩中的白云石以粉晶、细晶和泥晶为主,形态多为自形和半自形,晶形较好,单个晶体有明显的雾心亮边构造,白云石晶体接触紧密。孔隙以晶

表 1 西科 1 井部分白云岩矿物气液包裹体测定结果
Table 1 Results of inclusions in dolomite of well Xike 1

序号	样品深度/m	包裹体形态	气液比	均一温度/℃	冰点温度/℃	模拟深度/km	赋存矿物
1	1 064.80	气液两相	3:7	186.0		1.72	白云石
2	1 064.80	气液两相	2:8	195.0		1.82	白云石
3	1 064.80	气液两相	2:8	188.0		1.74	白云石
4	1 064.80	气液两相	2:8	201.0		1.88	白云石
5	1 116.80	气液两相	4:6	187.8		1.74	白云石
6	1 116.80	气液两相	3:7	196.7		1.84	白云石
7	1 116.80	气液两相	3:7	194.5		1.81	白云石
8	1 119.75	气液两相	2:8	161.7	-16.8	1.46	白云石
9	1 119.75	气液两相	3:7	147.8		1.31	白云石
10	1 119.75	气液两相	2:8	130.8	-14.4	1.13	白云石
11	1 119.75	气液两相	4:6	165.2		1.50	白云石
12	1 121.00	气液两相	4:6	187.7		1.74	白云石
13	1 121.00	气液两相	3:7	187.7		1.74	白云石
14	1 121.00	气液两相	3:7	176.4	-19.5	1.62	白云石
15	1 130.82	气液两相	4:6	200.3		1.88	白云石
16	1 130.82	气液两相	4:6	186.7	-14.3	1.73	白云石
17	1 130.82	气液两相	2:8	158.9		1.43	白云石
18	1 132.72	气液两相	2:8	192.3	-12.5	1.79	白云石
19	1 132.72	气液两相	2:8	181.2		1.67	白云石
20	1 145.70	气液两相	3:7	210.0		1.98	白云石
21	1 145.70	气液两相	2:8	185.7		1.72	白云石
22	1 145.70	气液两相	4:6	198.5		1.86	白云石
23	1 145.70	气液两相	2:8	205.9	-20.4	1.94	白云石
24	1 153.40	气液两相	3:7	194.9	-11.5	1.82	白云石
25	1 153.40	气液两相	2:8	192.9		1.80	白云石
26	1 153.40	气液两相	3:7	200.0		1.87	白云石
27	1 153.40	气液两相	4:6	195.9	-12.3	1.83	白云石
28	1 161.20	气液两相	4:6	194.8		1.82	白云石
29	1 161.20	气液两相	4:6	191.1		1.78	白云石
30	1 161.20	气液两相	3:7	189.2	-8.9	1.76	白云石
31	1 168.10	气液两相	4:6	185.5		1.72	白云石
32	1 168.10	气液两相	4:6	178.0	-8.2	1.64	白云石
33	1 173.90	气液两相	4:6	173.4		1.59	白云石
34	1 173.90	气液两相	2:8	181.8		1.68	白云石
35	1 176.55	气液两相	2:8	198.0		1.85	白云石
36	1 176.55	气液两相	2:8	191.4	-15.0	1.78	白云石

间孔为主, 孔隙细小呈分隔状, 互不连通, 次生溶蚀孔不发育。测试鉴定结果显示该层段的物性总体较差, 属于致密白云岩。

(2) 三亚组致密白云岩形成于准同生成岩阶段和后生成岩阶段。频繁的海平面变化和沉积物暴露, 导致多期的海水充注孔隙作用, 加上高温高盐的古海洋和地层环境, 为致密白云岩的形成创造了条件。

参考文献:

- [1] RONCHI P, ORTENZI A, BORROMEO O, et al. Depositional setting and diagenetic processes and their impact on the reservoir quality in the late Viséan–Bashkirian Kashagan carbonate platform (Pre-Caspian Basin, Kazakhstan)[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94: 1313-1348.
- [2] 谢习农, 谢玉洪, 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.

- [3] 魏喜, 祝永军, 许红, 等. 西沙群岛新近纪白云岩形成条件的探讨: C、O同位素和流体包裹体证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2394-2404.
- [4] 许红. “十二五”国家重大科技专项《南海新生代生物礁储层对比研究》子课题成果报告[R]. 青岛: 青岛海洋地质研究所, 2015.
- [5] 许红. 碳酸盐(岩)沉积学基础理论与进展[C]//第六届全国沉积学大会论文集. 南京, 2017.
- [6] 许红. 中国西沙人居环境珊瑚-珊瑚礁生态环境现状科考[C]//中国环境科学学会科学技术年会议论文集(第四卷). 西安: 中国环境科学学会, 2019: 955-962.
- [7] 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(4): 485-498.
- [8] 何起祥, 张明书. 西沙群岛新第三纪白云岩的成因与意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1990, 8(2): 45-55.
- [9] 许红, 张金川, 蔡峰, 等. 西沙群岛中新世生物礁矿物相研究及其意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(4): 15-23.
- [10] 刘宝珺. 沉积岩石学[M]. 成都: 成都地质学院出版社, 1980.
- [11] 黄擎宇, 刘伟, 张艳秋, 等. 白云石化作用及白云岩储层研究进展[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(5): 539-551.
- [12] 李鹏飞, 李建明, 斯尚华, 等. 中扬子西部上震旦统灯影组碳酸盐岩储层特征[J]. *岩性油气藏*, 2010, 22(2): 37-41.
- [13] 刘诗宇, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 四川盆地东部石炭系黄龙组白云岩成因[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(4): 40-46.
- [14] 倪新锋, 陈永权, 朱永进, 等. 塔北地区寒武纪深层白云岩构造-岩相古地理特征及勘探方向[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(5): 135-143.
- [15] 魏新善, 陈洪德, 张道锋, 等. 致密碳酸盐岩储集层特征与天然气勘探潜力: 以鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东部奥陶系马家沟组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(3): 319-329.
- [16] 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(中国地质大学学报)*, 2015, 40(4): 633-644.
- [17] NA Q, XU H, SU D P, et al. Microscopic characteristics and geological significance of tight dolomite in well Xike-1, Xisha Islands, China[J]. *China Geology*, 2019, 2(4): 458-466.
- [18] 王小端, 王亚辉, 刘娟, 等. 中国南海西沙地区西科1井白云岩中锰质矿物特征及研究意义[J]. *矿物岩石*, 2020, 40(2): 81-91.
- [19] 史德锋, 李潇雨, 王亚辉, 等. 中国南海西沙地区西科1井中新统白云岩中微生物特征及其对白云石化的启示[J]. *矿物岩石*, 2020, 40(2): 104-113.
- [20] 许红. 中国海域及邻区含油气盆地生物礁的对比研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1992, 12(4): 41-52.
- [21] 杨树庄. 大冰期成因探讨[J]. *世界地质*, 2004, 23(3): 252-254, 294.
- [22] MACHEL H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 2004, 235(1): 7-63.
- [23] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2010.

CHARACTERISTICS AND DIAGENETIC ENVIRONMENT OF TIGHT DOLOSTONE IN WELL XIKE 1, SOUTH CHINA SEA

DONG Gang^{1,2}, LIU Xinyu³, LI Xushen³,
ZHANG Daojun³, YAN Guijing^{1,2}, SU Dapeng^{1,2}, XU Hong^{1,2,4*}

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China;

2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;

3 Zhanjiang Branch of CNOOC (China) Ltd., Zhanjiang 524057, China; 4 First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: Well Xike-1 is the most complete coring well to reveal the reef formation in the South China Sea. Tight dolostone is developed in the Miocene Sanya Formation, with porosity of 1.65% ~ 16.4%, and an average of 6.7%. The local permeability is only $(11.8 \sim 39) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, and the average permeability is less than $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. Based on sedimentary petrology, petrophysical properties of porosity and permeability and inclusion testing methods, the diagenetic characteristics of tight dolostone are analyzed, and the diagenetic evolution conditions are discussed. The dolomite in the tight dolostone is mainly composed of powder crystal, fine crystal and mud crystal. The morphology of dolomite is mostly euhedral and subhedral. The crystal shape is good, with fog center and bright edge structure. The dolomite crystal contacts closely. The intergranular pores are fine, separated and disconnected, and the secondary corrosion pores are not developed. The tight dolostone of Sanya Formation was formed in the stage of syngenetic and post genetic rocks. Frequent sea-level changes and sediment exposure lead to multi-stage seawater filling porosities, coupled with high temperature and high salinity paleo marine and stratigraphic environment, which create conditions for the formation of tight dolostone.

Key words: well Xike 1; tight dolostone; rock characteristics; diagenetic environment