

doi:10.3799/dqkx.2015.054

# 西沙群岛西科 1 井第四纪生物礁中典型暴露面的岩石学与孔隙特征

尤 丽<sup>1</sup>, 于亚苹<sup>2</sup>, 廖 静<sup>1</sup>, 刘 立<sup>2\*</sup>, 刘 娜<sup>2</sup>, 赵 爽<sup>2</sup>, 李 晓<sup>2</sup>

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057  
2. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

**摘要:** 根据岩心观察、薄片鉴定和图像分析, 对西科 1 井第四纪发育的典型暴露面及其附近的岩石类型、成岩作用和孔隙类型进行了系统的分析。研究表明: 典型暴露面(埋深 68.75~70.24 m)附近的岩石类型为骨架灰岩和泥粒灰岩, 成岩作用类型包括溶解作用、胶结作用、泥晶化作用和新生变形作用, 孔隙类型主要为粒间孔和粒间溶孔、粒内孔及粒内溶孔、生长骨架孔及其溶孔、铸模孔和晶间溶孔。碳酸盐矿物的悬垂状产状、生物体腔孔充填物的方解石化和普遍发育的溶解作用指示该深度段遭受了大气水淋滤的强烈改造。

**关键词:** 西科 1 井; 暴露面; 岩石学; 孔隙类型; 成岩环境; 海洋地质。

**中图分类号:** P588.24      **文章编号:** 1000-2383(2015)04-0671-06      **收稿日期:** 2014-09-05

## Petrological Characteristics and Pore Types of Quaternary Reef Adjacent Typical Exposed Surface in Well Xike-1, Xisha Islands

You Li<sup>1</sup>, Yu Yaping<sup>2</sup>, Liao Jing<sup>1</sup>, Liu Li<sup>2\*</sup>, Liu Na<sup>2</sup>, Zhao Shuang<sup>2</sup>, Li Xiao<sup>2</sup>

1. Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation (CNOOC) Limited, Zhanjiang 524057, China  
2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

**Abstract:** Diagenesis and pore characteristics of Quaternary reef-carbonate adjacent typical exposed surfaces in well Xike-1 have been illuminated by means of core observation, thin-section rock identification and image analysis. The results show that the rock types around the typical exposed surface in the depth of 68.75–70.24 m include packstones and grainstone. And associated diagenesis includes dissolution, cementation, micritization and neomorphism. The pore types identified include intergranular pore, intergranular dissolved pore, intragranular pore, intragranular dissolved pore, skeleton growth pore, skeleton growth dissolution pore, modic pore and intergranular dissolved pore. Drapstone shape of the carbonate mineral, calcite filling in the pore and common dissolution of calcite indicate that the depth section was reformed strongly by the atmospheric water leaching.

**Key words:** well Xike-1; exposed surface; petrology; pore type; diagenetic environment; marine geology.

## 0 引言

国内外油气勘探实践表明, 生物礁油气藏在世界油气储量中占有重要的地位(魏喜等, 2008)。西沙海域广泛发育新近纪以来形成的生物礁(魏喜等,

2006a, 2006b), 并且在西永 2 井、西石 1 井(赵强, 2010)和西琛 1 井(Liu *et al.*, 1997)均识别出数量不等的暴露面。海相地层中的暴露面是由于海平面下降使滨岸带及上部大陆架部分沉积区露出水面或接近露出水面形成的具暴露侵蚀、岩溶等标志的古侵

**基金项目:** 中国海洋石油总公司项目(No. CNOOC-2013-ZJ-01); 国家重大专项(No. 2011ZX05025-002)。  
**作者简介:** 尤丽(1983—), 女, 主要从事沉积储层研究。E-mail: youli1@cnooc.com.cn  
**\* 通讯作者:** 刘立, E-mail: liuli0892@vip.sina.com

蚀面、古风化面或古喀斯特面(王剑等,1996).生物礁是一种特殊类型的碳酸盐岩,陆上暴露是生物礁储层中次生孔隙形成的重要机制之一(孙启良等,2008).通过详细的岩心观察,在西科 1 井钻遇的岩心中已识别出 7 个暴露面(朱伟林等,2015).其中,在第四系全新一更新统乐东组地层中发育 5 个暴露面.本文以发育于乐东组埋深为 68.67~72.07 m 处的暴露面为主要研究对象,通过暴露面附近岩石类型、成岩作用和孔隙类型的系统描述,揭示暴露面的形成机制,为西沙海域生物礁储层评价和预测提供信息和依据.

1 暴露面产状

乐东组发育的 5 个暴露面的分布深度为 0~2.90 m、21.93~22.41 m、37.30~38.15 m、68.67~72.50 m 和 97.58~98.84 m,其影响的地层厚度依次为 2.90 m、0.48 m、0.85 m、3.83 m 和 1.26 m.这些暴露面以浅黄、褐黄、及浅红褐色调和半固结为特征.

暴露面也发现于西沙岛礁的其他钻井中.例如,根据碳氧同位素及岩心观察,在西琛 1 井识别出 14 个暴露面.在西永 2 井,暴露面发育于第三系 377~381 m,并以锈黄色和锈褐色为特征.在西石 1 井钻遇的厚达 24.68 m 的砂屑灰岩,赵强(2010)将其解释为风成成因,并将该套灰岩称为风成碳酸盐岩.在石岛地表,风成碳酸盐岩分布极为普遍.赵强等(2013)认为,石岛风成碳酸盐岩形成于末次冰期或末次间冰期,其形成时代为晚更新世.石岛风成碳酸盐岩是迄今为止东亚季风更新世期间在南海惟一的陆上堆积物.此外,在石岛地表也出露化石古土壤层.化石古土壤层出露的海拔标高为 1~10 m,按照产状和分布可为上、下两层,厚度为 20~40 cm(业治铮等,1984).在最近的研究中,赵强等(2013)识别出 4 层可连续追踪的化石古土壤层,其最大厚度<1.6 m,大多数化石古土壤层的厚度<0.5 m.化石古土壤层的主要特征(业治铮等,1984)包括:(1)顶部发育钙结层;(2)主体呈疏松球粒状结构;(3)间夹 1 至数层硬盘(hardpan);(4)下伏层为发育交错层理的生物碎屑砂岩.根据业治铮等(1984)的描述,土壤层中的疏松球粒直径为 1~5 mm;在硬盘(hardpan)中隐约见植物根痕,并见有原地陆生腹足类蜗牛化石和生长在潮间带的蝶螺.最近的观察表明,化石古土壤层分布于风成砂屑灰岩层中(赵强等,2013).

2 岩石类型与成岩作用

2.1 岩石类型

按照 Embry and Klovan(1971)基于 Dunham(1960)方案修改的碳酸盐岩划分方案,埋深 68.67~72.07 m 的岩石类型主要为粒泥灰岩,其次为骨架灰岩(图 1).其主要特征如下.

泥粒灰岩(packstone)主要由生物碎屑和泥晶组成,其中生物碎屑占多数,生物碎屑包括钙藻类、珊瑚和有孔虫.生物碎屑分选差,形状多样,呈次棱角状一次圆状,大小不一,粒径范围为 0.2~2.0 mm.少数珊瑚藻和仙掌藻骨架保存较好,可见较完整的骨架形态,长径多在 1.0~3.0 mm 之间.有孔虫碎屑破碎程度不一,形态各异,分选较差,大小不一,粒径多为 0.2~2.0 mm,保存完好的有孔虫其长径为 2.0~3.0 mm.生物碎屑及生物骨架含量 50%~

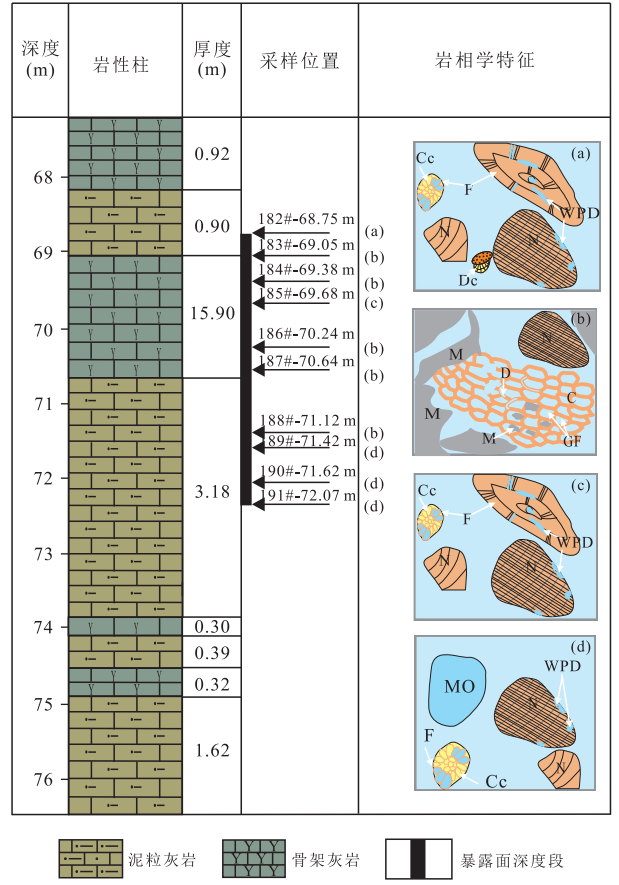


图 1 西科 1 井埋深 67.2~76.4 m 及其邻近上覆和下伏岩石类型

Fig.1 Rock types in the depth of 67.2—76.4 m and adjacent overlying and underlying strata in well Xike-1

WPD.粒内溶孔;GF.生长骨架孔;MO.铸模孔;Cc.方解石胶结物;DC.悬垂状胶结物;M.基质;D.溶解作用;N.珊瑚藻;F.有孔虫;C.珊瑚

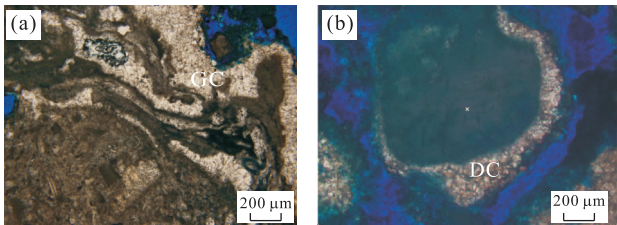


图 2 第四系生物礁碳酸盐岩中胶结物特征

Fig.2 Characteristics of cement types in Quaternary reef-carbonate

a.粒状方解石胶结物(埋深 69.68 m,骨架灰岩,单偏光,铸体薄片);  
b.悬垂状方解石胶结物(埋深 68.75 m,泥粒灰岩,单偏光,铸体薄片);GC.粒状方解石;DC.悬垂状方解石

90%.基质为泥晶,含量 10%~40%.胶结物为粒状亮晶方解石,为颗粒支撑结构.

骨架灰岩(framestone)中的造架生物主要为六射珊瑚,其次为壳状珊瑚藻.造架生物的生长骨架孔可被灰泥或被灰泥与粒状方解石共同充填,有时甚至无任何充填物.生长骨架孔内灰泥充填的多少,反映沉积环境水动力条件的强弱.一般情况下,水动力条件强的高能沉积环境灰泥含量低,水动力条件弱的低能沉积环境灰泥含量高.

2.2 成岩作用

埋深 68.67~72.07 m 暴露面的成岩作用类型包括溶解作用、胶结作用、新生变形作用和泥晶化作用,其特征主要如下.

溶解作用主要见于珊瑚藻、珊瑚和早期方解石胶结物的内部和边部(图 3).

胶结物主要为方解石,其产状以粒状为主,偶有悬垂状.粒状胶结物(图2a)是由相对等粒的充填在

孔隙中的晶体组成,晶体大小为 0.07~0.15 mm,呈他形或半自形.在悬垂状胶结物(图 2b)中,方解石集合体为倒锥状.

新生变形作用以节状珊瑚藻的文石质骨架转变为低镁方解石为特征.在这种低镁方解石中,往往局部仍保留着纤维状结构,并且方解石的晶体相对较浑浊.新生变形作用形成的方解石的晶粒直径为 0.07~0.25 mm.指示泥晶化作用的泥晶套一般保完整.暴露面附近成岩作用的纵向分布详见表 1.

3 孔隙类型及特征

埋深 68.67~72.07 m 层段暴露面附近碳酸盐岩中发育的孔隙类型包括原生孔隙和次生孔隙.其中,次生孔隙为大气水淋滤的结果.

3.1 原生孔隙

通过铸体薄片观察识别出来的原生孔隙类型包括粒间孔、粒内孔、生长骨架孔,其主要特征如下.

粒间孔为生物骨架或生物碎屑颗粒之间的孔隙,发育于研究区整个深度段,较常见.

粒内孔包括生物体腔孔和胞囊孔.其中,生物体腔孔主要发育在有孔虫内,遗憾的是,大部分体腔孔已被方解石所充填.胞囊孔主要见于仙人掌藻,但是绝大部分胞囊孔也被方解石胶结物充填.

生长骨架孔主要为珊瑚骨架孔.其孔隙多为圆形和椭圆形,孔径介于 0.1~1.0 mm.大部分生长被泥晶和亮晶方解石充填,泥晶充填物的充填类型分为两种:一种为环边充填,另一种为完全充填或半充填(图 3f).亮晶方解石的充填类型也分为两种:一种

表 1 西科 1 井典型暴露面附近成岩作用类型纵向分布

Table 1 The vertical distribution of diagenesis types near the typical exposed surface in well Xike-1

| 薄片号 | 埋深(m) | 岩石类型 | 成岩作用类型 |        |       |  | 胶结作用 |     |
|-----|-------|------|--------|--------|-------|--|------|-----|
|     |       |      | 溶解作用   | 新生变形作用 | 泥晶化作用 |  | 粒状   | 悬垂状 |
| 182 | 68.75 | 泥粒灰岩 | R      | R      | C     |  |      | C   |
| 183 | 69.05 | 骨架灰岩 | C      |        |       |  | C    |     |
| 184 | 69.38 | 骨架灰岩 | C      |        | R     |  | C    |     |
| 185 | 69.68 | 骨架灰岩 | R      |        | C     |  | C    |     |
| 186 | 70.24 | 骨架灰岩 | C      |        | R     |  | C    |     |
| 187 | 70.64 | 骨架灰岩 | C      |        |       |  |      |     |
| 188 | 71.12 | 泥粒灰岩 | R      |        |       |  | C    |     |
| 189 | 71.42 | 泥粒灰岩 | C      |        |       |  | R    |     |
| 190 | 71.62 | 泥粒灰岩 | C      |        |       |  |      |     |
| 191 | 72.07 | 泥粒灰岩 | C      | R      |       |  | C    |     |

注: C.常见;R.少见.

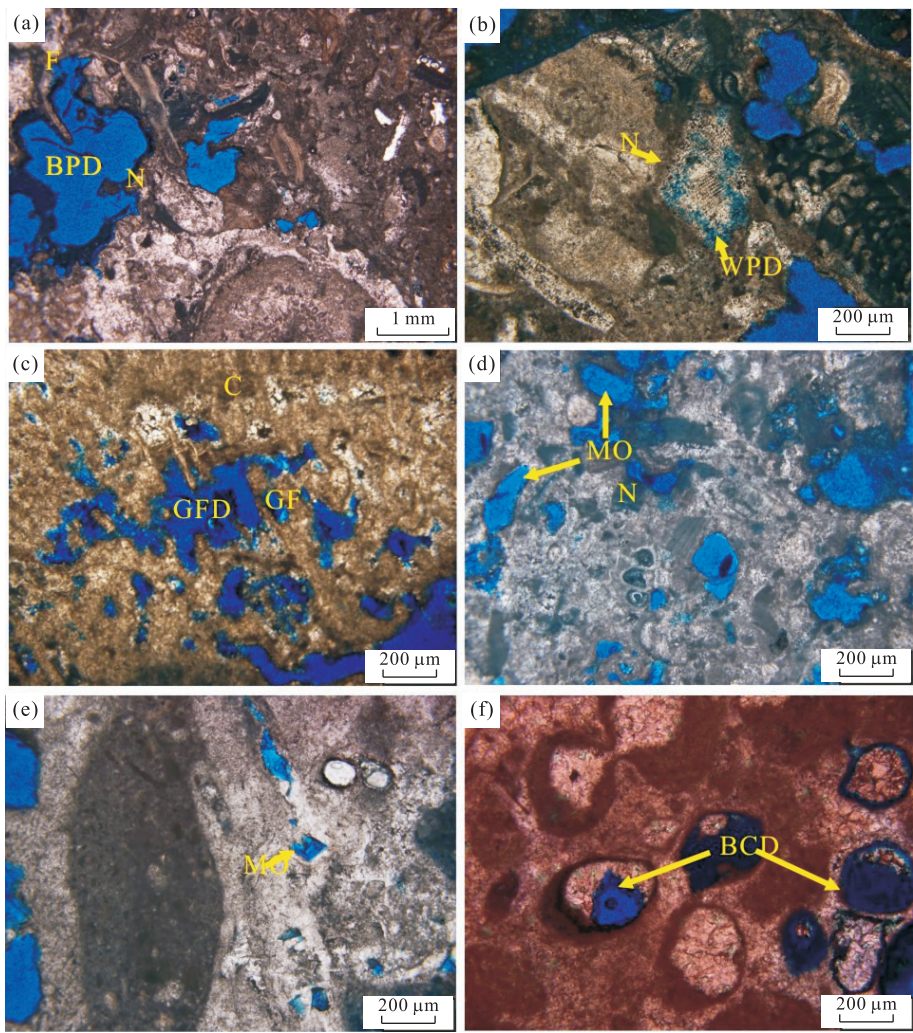


图 3 溶解和次生孔隙类型

Fig.3 Dissolution and secondary pore type

a.粒间溶孔(BPD),相邻的有孔虫(F)和珊瑚藻(N)被溶解连通形成特大孔(埋深 69.68 m,骨架灰岩,单偏光,铸体薄片);b.粒内溶孔,珊瑚藻(N)被溶解形成弥漫状微孔(WPD)(埋深 69.68 m,骨架灰岩,单偏光,铸体薄片);c.生长骨架溶蚀孔(GFD),珊瑚骨架(C)中的部分隔壁被溶解,导致生长骨架孔(GF)连通(埋深 70.24 m,骨架灰岩,单偏光,铸体薄片);d.铸模孔(MO),珊瑚藻内部完全被溶解,仅保留珊瑚藻的轮廓(埋深 71.62 m,泥粒灰岩,1 单偏光,铸体薄片);e.晶模孔(MO),自形的方解石晶体内部完全被溶解,仅保留方解石的轮廓(埋深 70.64 m,骨架灰岩,单偏光,铸体薄片);f.晶间溶孔(BCD),充填于生长骨架孔中的方解石边缘被溶解成港湾状(埋深 69.05 m,骨架灰岩,单偏光,铸体薄片)

充填于未被充填的生长骨架中,另一种充填于被泥晶充填的生长骨架残余孔中,两种充填方式的方解石都有被溶蚀的现象.

3.2 次生孔隙

通过铸体薄片观察识别出来的次生孔隙类型包括粒间溶孔、粒内溶孔、生长骨架溶孔、铸模孔和晶间溶孔,其主要特征如下.

粒间溶孔是指跨越生物骨架的溶蚀孔或残余粒间孔中亮晶胶结物被溶蚀形成的孔隙,研究区粒间溶孔为跨越生物骨架溶蚀孔,孔隙边缘呈港湾状,有时可见相邻生物骨架骨架被溶而形成的特大孔(图 3a),该类孔隙量少,仅见于 69.68 m 处.

粒内溶孔主要发育于节状珊瑚藻中,并且以发育弥漫状微孔(图 3b)为特征,微孔的范围为 0.01~0.05 mm.

生长骨架溶孔是指珊瑚骨架内部被溶解形成的孔隙和珊瑚骨架溶蚀扩大连通生长骨架孔的孔隙(图 3c).研究区生长骨架溶孔中珊瑚骨架溶解扩大连通生长骨架孔的孔隙较为发育,是研究区主要次生孔隙类型,其孔隙形态不规则,多为条带状,孔隙长径多为 0.10~1.20 mm;珊瑚骨架内部溶蚀孔发育较少,孔隙直径较小,约 0.05~0.20 mm.

铸模孔包括颗粒铸模孔和晶模孔.铸模孔是节状珊瑚藻和方解石晶体的强烈溶解造成的,表现为其内

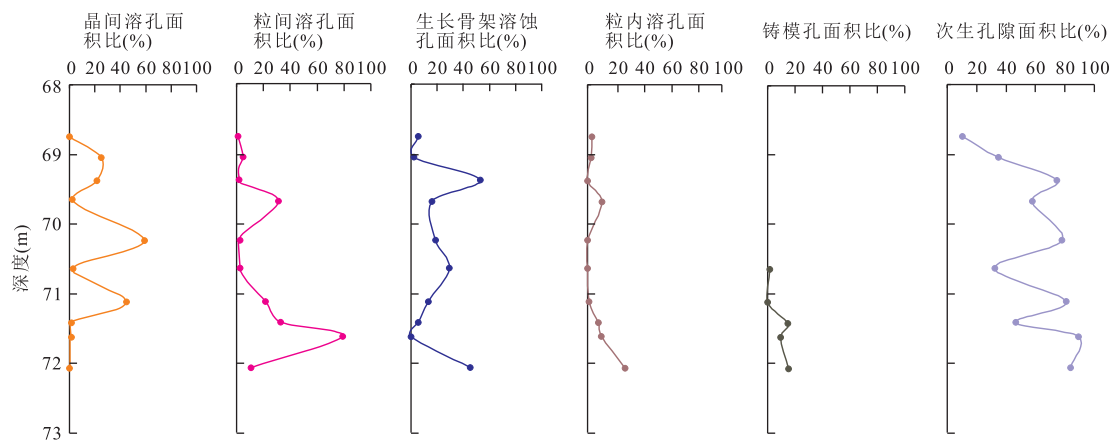


图 4 典型暴露面附近孔隙类型和次生孔隙纵向分布

Fig.4 The pore types near the typical exposed surface and the vertical distribution of secondary porosity

部已被溶解殆尽仅残留外缘.其中,珊瑚藻铸模孔(图 3d)的孔隙直径介于 0.05~0.40 mm.方解石的晶模孔呈菱形(图 3e),孔隙直径为 0.10 mm 左右.

晶间溶孔直径介于 0.05~0.45 mm.主要表现为群体六射珊瑚的分枝之间方解石的溶解和珊瑚中充填的方解石的溶解(图 3f).

晶间溶孔仅出现在埋深 69.05 m、69.38 m、69.68 m 和 70.64 m 处,以上几处岩石类型均为为骨架灰岩,晶间溶孔为生长骨架孔中亮晶方解石的溶蚀.粒间溶孔在暴露面下部较发育,其分布的深度为 71.12 m、71.42 m、71.62 m、72.07 m.其中在 71.62 m 处面积比值最高达 80%,该处岩石类型为泥粒灰岩,粒间孔中充填了大量基质,生物骨架溶蚀扩大连通基质,粒间溶孔较为发育.生长骨架溶蚀孔在研究区岩石类型为骨架灰岩的深度段比较发育,仅 68.75 m、71.62 m 两处未发育.粒内溶孔和铸模孔均不怎么发育.在纵向上,次生孔隙面积比呈先增加后减少韵律式演化,晶间溶孔和生长骨架溶蚀孔的变化趋势与次生孔隙一致,说明次生孔隙主要由晶间溶孔和生长骨架溶蚀孔组成(图 4).

4 讨论

生物礁—碳酸盐岩中的暴露面是海平面升降的忠实记录.研究表明,西沙群岛生物礁形成时期海平面变化频繁,尤其是第四纪时期.其中,在西琛 1 井第四系中已识别出 14 个暴露面(Liu *et al.*,1997).

暴露面附近碳酸盐岩的成岩作用与大气水有关.海平面的下降导致生物礁出露于海面之上,进而遭受大气水的淋滤的改造.根据西琛 1 井(Liu

*et al.*,1997)、西石 1 井和西永 2 井(赵强,2010)的岩心观察和碳氧同位素资料,西沙群岛的大气水淋滤的深度下限约为 200 m.在碳酸盐岩地层中,大气水淋滤往往形成具有新月形、悬垂状等独特产状(Halley and Harris, 1979; Longman, 1980; James and Choquette, 1984)的胶结物.埋深 68.75 m(图 2b)处的碳酸盐胶结物显然属于典型的悬垂状产状.根据翟世奎(2015)的研究,在西科 1 井,文石和高镁方解石的分布下限为 35.34 m,超过该界限碳酸盐矿物则以低镁方解石为主.因此,所研究深度段(68.67~72.07 m)内生物体腔孔充填的碳酸盐矿物为低镁方解石.其最初的矿物类型应为文石或高镁方解石.这种现象亦称为方解石化.方解石化被认为与大气水淋滤有关(Liu *et al.*, 1997).其形成机制是,由于文石和高镁方解石比低镁方解石易于溶解,当大气水作用于文石或高镁方解石时,将导致文石或高镁方解石溶解而低镁方解石沉淀.显然,碳酸盐胶结物的产状(悬垂状)和方解石化的存在都暗示了埋深 68.67~72.07 m 处的碳酸盐岩普遍遭受了大气水的淋滤作用.因此,该深度段内生物骨架、生物碎屑以及自生矿物遭受的溶解与形成的各种溶孔应该都与大气水的强烈淋滤有关.

5 结论

埋深 68.75~70.24 m 范围内暴露面附近的岩石类型为骨架灰岩和泥粒灰岩.成岩作用类型包括溶解作用、胶结作用、泥晶化作用和新生变形作用.孔隙类型主要为粒间孔和粒间溶孔、粒内孔和粒内溶孔、生长骨架孔和生长骨架溶蚀孔、铸模孔和晶间

溶孔.碳酸盐矿物的悬垂状产状、生物体腔孔充填物的方解石化和普遍发育的溶蚀、溶解作用均指示该深度段遭受了大气水淋滤的强烈改造.

## References

- Dunham, R. J., 1960. Classification of Carbonate Rocks according to Depositional Texture. In: Ham, W. E., ed., M 1: Classification of Carbonate Rocks—A Symposium. *Mem. Am. Ass. Petrol. Geol.*, (1): 108—121.
- Embry, A. F., Klován, J. E., 1971. A Late Devonian Reef Tract on Northeastern Banks Island. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, 19(4): 730—781.
- Halley, R. B., Harris, P. M., 1979. Fresh-Water Cementation of a 1 000 Year-Old Oolite. *Journal of Sedimentary Petrology*, 49: 969—988.
- James, N. P., Choquette, P. W., 1984. Diagenesis 9. Limestones—The Meteoric Diagenetic Environment. *Geosci. Can.*, 11(4): 161—194. doi: 10.12789/gsc.v11i4.3395
- Liu, J., Ye, Z. Z., Han, C. R., et al., 1997. Meteoric Diagenesis in Pleistocene Reef Limestones of Xisha Islands, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15(6): 465—476. doi: 10.1016/S0743-9547(97)00049-4
- Longman, M. W., 1980. Carbonate Diagenetic Textures from Nearsurface Diagenetic Environments. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 64: 461—487.
- Sun, Q. L., Ma, Y. B., Zhao, Q., et al., 2008. Different Reef Carbonate Diagenesis and Its Influential Factors, Northern South China Sea. *Natural Gas Geoscience*, 19(5): 665—672 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Zhao, Y. G., Li, Z. X., et al., 1996. An Outcrop Sequence Division Model: Example from the Devonian Basin in Northern and Central Guangxi. *Journal of Palaeogeography*, 16(6): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Wei, X., Zhu, Y. J., Xu, H., et al., 2006a. Constrains and Growing Trend of Biological Reef in South China Sea Basin. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 13(1): 7—13 (in Chinese with English abstract).
- Wei, X., Zhu, Y. J., Yin, J. H., et al., 2006b. Constrains and Growing Trend of Biological Reef in South China Sea Basin. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 13(1): 10—15 (in Chinese with English abstract).
- Wei, X., Jia, C. Z., Meng, W. G., 2008. Dolomitization Characteristics of Carbonate Rock in Xisha Islands and Its Formation: A Case Study of Well Xichen-1. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(2): 217—224 (in Chinese with English abstract).
- Ye, Z. Z., Zhang, M. S., Han, C. R., et al., 1984. A New Discovery on Shidao Island of Xisha Archipelago: Eolianite (Eolian Calcarene) and Fossil Soils. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 4(1): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, S. K., Mi, L. J., Shen, X., et al., 2015. Mineral Compositions and Their Environmental Implications in the Reef of Shidao Island, Xisha. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(4): 597—605 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Q., 2010. The Sedimentary Research about Reef Carbonate in Xisha Islands Waters (Dissertation). Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Q., Xu, H., Wu, S. G., et al., 2013. Early Diagenesis of Late Pleistocene Aeolian Carbonate Sediment on Shidao Island, Xisha Island. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(2): 220—236 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., Wang, Z. F., Mi, L. J., et al., 2015. Sequence Stratigraphic Framework and Reef Growth Unit of Borehole Xike-1 from Xisha Islands, South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(4): 677—687 (in Chinese with English abstract).

## 附中中文参考文献

- 孙启良, 马玉波, 赵强, 等, 2008. 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. *天然气地球科学*, 19(5): 665—672.
- 王剑, 赵玉光, 李忠雄, 等, 1996. 一个露头层序地层划分模型——以桂中北泥盆纪盆地为例. *岩相古地理*, 16(6): 1—13.
- 魏喜, 贾承造, 孟卫工, 2008. 西沙群岛西琛 1 井碳酸盐岩白云石化特征及成因机制. *吉林大学学报(地球科学版)*, 28(2): 217—224.
- 魏喜, 祝永军, 许红, 等, 2006a. 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. *岩石学报*, 22(9): 2394—2404.
- 魏喜, 祝永军, 尹继红, 等, 2006b. 南海盆地生物礁形成条件及发育趋势. *特种油气藏*, 13(1): 10—15.
- 业治铮, 张明书, 韩春瑞, 等, 1984. 西沙石岛风成石灰岩和化石土壤层的发现及其意义. *海洋地质与第四纪地质*, 4(1): 1—10.
- 翟世奎, 米立军, 沈星, 等, 2015. 西沙石岛生物礁的矿物组成及其环境指示意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(4): 597—605.
- 赵强, 2010. 西沙群岛海域生物礁碳酸盐岩沉积学研究(博士学位论文). 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所).
- 赵强, 许红, 吴时国, 等, 2013. 西沙石岛风成碳酸盐沉积的早期成岩作用. *沉积学报*, 31(2): 220—236.
- 朱伟林, 王振峰, 米立军, 等, 2015. 南海西沙西科 1 井层序地层格架与礁生长单元特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(4): 677—687.