

兰叶芳, 黄思静, 周小康, 等. 珠江口盆地东沙隆起珠江组灰岩成岩环境的恢复[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1837-1850.

Lan Yefang, Huang Sijing, Zhou Xiaokang, et al. The recovery of diagenetic environments of limestone in Early Miocene Zhujiang Formation, Pearl River Mouth Basin[J]. *Geology in China*, 2015, 42(6): 1837-1850(in Chinese with English abstract).

珠江口盆地东沙隆起珠江组灰岩成岩环境的恢复

兰叶芳¹ 黄思静² 周小康³ 曾 熠³ 马永坤³

(1. 贵州工程应用技术学院(矿业工程学院), 贵州 毕节 551700; 2. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059;
3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 广州 510024)

摘要:本文主要在岩心观察和描述的基础上,借助于薄片分析、扫描电镜分析和阴极发光分析,通过不同成岩组构的识别及其成岩作用特征分析,结合区域地质背景,恢复珠江口盆地东沙隆起珠江组灰岩经历的成岩环境。结果表明:(1)整体的海侵背景和渐进埋藏过程使得珠江组灰岩中不发育表生成岩作用,但是频繁的海平面变化使得古地貌高部位生长的灰岩受到大气淡水的成岩改造,珠江组灰岩主要经历了海水潜流、大气淡水渗流、大气淡水潜流和埋藏环境等成岩环境;(2)不同成岩环境具有明显不同的成岩组构特征。海水潜流环境的成岩组构主要有广泛发育的藻的包壳作用和藻类-生物的相互包裹、生物钻孔的发育、泥晶化作用、海绿石的形成以及等厚纤维状环边胶结物、颗粒表面的刀刀状或叶片状胶结物、犬牙状胶结物和共轴生长方解石胶结物的发育;淡水潜流环境的主要成岩特征包括粒状亮晶方解石胶结物、棘皮多期共轴加大边和有限的溶解作用;淡水渗流环境中识别的成岩特征有非组构选择性溶解作用、示底构造、微型钟乳状胶结物和新月形胶结物;埋藏成岩环境的成岩作用主要包括压实、压溶作用、晚期溶蚀作用以及油气的侵位。

关键词:成岩组构;成岩环境;成岩作用;珠江组;珠江口盆地

中图分类号:P588.2;P588.24⁵ 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2015)06-1837-14

The recovery of diagenetic environments of limestone in Early Miocene Zhujiang Formation, Pearl River Mouth Basin

LAN Ye-fang¹, HUANG Si-jing², ZHOU Xiao-kang³, ZENG Yi³, MA Yong-kun³

(1. Institute of Mining Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, Guizhou, China;

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

3. CNOOC (China) Co., Ltd., -Shenzhen, Guangzhou 510240, Guangdong, China)

Abstract: Based on core description, thin section observation, SEM and cathodoluminescence analysis, combined with regional geological setting, the authors tried to recover the diagenetic environments of limestone in Early Miocene Zhujiang Formation of Pearl River Mouth Basin by identifying the diagenetic fabrics and analyzing the diagenetic characteristics. Some conclusions have been reached: 1) No epigenesis is developed in Zhujiang Formation limestone because of the transgressive

收稿日期:2014-09-18;改回日期:2015-01-13

基金项目:国家科技重大专项(Z2008SLSZ-052),国家自然科学基金(41172099,41272130)和黔教合KY字[2015]504联合资助。

作者简介:兰叶芳,女,1985年生,博士,主要从事沉积地质学研究;E-mail: wssbdnn@163.com。

background and gradual burial history. However, frequent changes in sea level result in the influence of meteoric water on limestone in the high part of the palaeo-geomorphology. The main diagenetic environments developed in Zhujiang Formation limestone include marine phreatic environment, fresh water phreatic environment, fresh water vadose environment and burial diagenetic environment. 2) Marine phreatic environment is the first and foremost environment that the Zhujiang Formation limestone have experienced during the diagenetic process, in which the main diagenesis includes the encrustation of red algae and mutual crusting effect between red algae and other organisms, the development of organism borings, early lithification of micrite and the formation of micrite envelope, glauconite formation, and the cementation of fringing fibrous calcite, bladed spar calcite and syntaxial calcite. Fresh water phreatic environment is characterized by the cementation of equant and massive calcite and mosaic sparry calcite in optical continuity with enclosed echinoderm fragment, and limited solution, while fresh water vadose environment is lack of cementation but has typical features of non-fabric selective solution and geopetal structure. Chemical compaction, development of stylolite, late leaching and oil emplacement are common in the middle to deep burial diagenetic environment.

Key words: cement fabric; diagenetic environment; diagenesis; limestone of Zhujiang Formation; Pearl River Mouth Basin

About the first author: LAN Ye-fang, female, born in 1985, doctor, engages in the study of sedimentary geology; E-mail: wssbdnn@163.com.

珠江口盆地是多年来南海油气勘探的主要盆地之一,已发现的西江、惠州、陆丰以及流花等油田构成了珠江口盆地主要的油气富集区^[1]。多年来中海油深圳分公司、中国科学院和有关大专院校在南海珠江口盆地碳酸盐岩油气勘探领域取得了大量令世人瞩目的成果,但在碳酸盐岩沉积学领域,研究成果仍然主要集中在盆地基底性质和构造演化^[2-4]、断裂特征^[5-6]、地层和古生物特征^[7-10]、地层测井和地震解释^[11-12]、古地理和古环境^[13]、海平面变化^[7,14]、沉积相和层序地层学^[15-17]以及油气成藏机理^[18]等方面,与成岩作用有关的研究相对较少,已见报道的研究成果包括 Sattler et al.(2004)^[19]讨论了珠江组碳酸盐岩深埋藏条件下的溶解作用;岳大力等(2005)^[20]分析了LH11-1油田珠江组生物礁灰岩的沉积及其成岩作用类型和演化特征;孙启良等(2008)^[21]研究了南海北部东沙和西沙生物礁碳酸盐岩的成岩差异并探讨了其影响因素;王永凤等(2011)^[22]概述了珠江口盆地的储层发育特征;吴熙纯等(2010)^[23-24]在探讨碳酸盐岩白垩状结构成岩环境和成因机制的基础上,重点关注了南海早中新世东沙台地流花地区生物礁滩碳酸盐岩的白垩状结构及其相应的储层孔隙特征;古莉等(2012)^[25]对珠江口盆地流花油田新近系生物礁灰岩的储集类型进行划分并探索其成因。尽管数量不多,但前人的研究成果为进一步的珠江组碳酸盐岩成岩作用的研究提供了很有价值的借鉴材料。因此,本文在前人研究的基础上,选取珠江口盆地东沙隆起发育的

中新世珠江组灰岩为研究对象,在岩心观察的基础上,主要通过普通薄片和铸体薄片的鉴定和分析,结合相应的扫描电镜和阴极发光分析,探讨珠江组灰岩的岩石学特征,恢复不同成岩组构所反映的岩石经历的成岩环境,为更深入的理论研究和进一步的油气勘探提供基础的地质依据。

1 地质背景

珠江口盆地位于中国南海陆架边缘,是在古生代和中生代的变质岩和中生代的岩浆岩基底上发育起来的,自形成以来经历了多次构造运动的改造。古新世一始新世开始的断裂作用使得珠江口盆地产生了隆拗相间的构造格局(图1),从北东向南西依次为北部断阶带、北部拗陷带、中央隆起带、南部拗陷带和南部隆起带。其中,中央隆起带包含东沙隆起和神狐隆起两个次一级构造单元,此次研究样品则来自东沙隆起钻井取心段(图1)。

早中新世温暖潮湿气候条件下,随着裂陷作用之后东沙隆起的逐渐沉降以及早中新世海侵作用的进行,东沙隆起上的沉积序列主要表现为中生代火山岩基底之上发育河流相—滨浅海相砂岩,大致在21 Ma左右短周期的海平面上升旋回中珠江组碳酸盐沉积发育于陆源碎屑滩之上,其厚度可达562 m以上,而随着海侵作用的进行,碳酸盐岩的生长速率赶不上海平面的上升速率,最终被上覆泥岩覆盖消亡^[26](图2)。珠江组碳酸盐岩的生长主要包括两个时期,早期的珠江组台地碳酸盐岩分布范围广

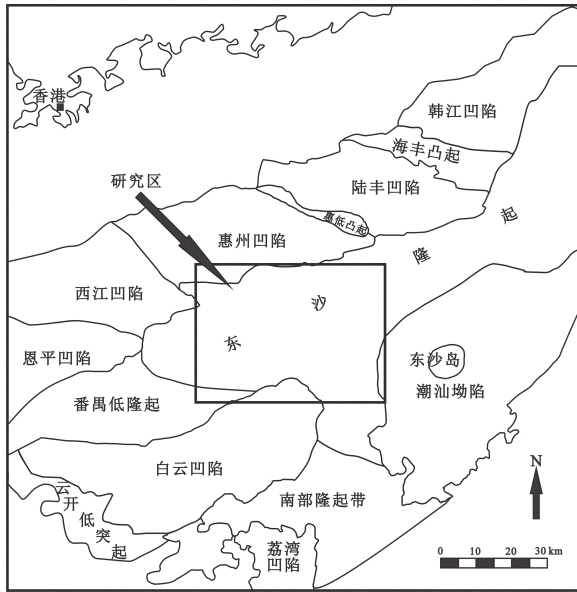


图1 珠江口盆地东部构造单元划分以及研究区
Fig.1 Structural units of Pearl River Mouth Basin and the study area

Ma	世	地层组	岩性	沉积环境
10	更新世			
	上新世	万山组		海相泥岩
20	中新世	晚		半深海—深海泥岩
		中	韩江组	深海泥岩
	早	珠江组	碳酸盐台地(浅海) 河流相砂岩	
30	渐新世	珠海组	河流相砂岩	
中生代基底(火成岩)				

图2 珠江口盆地地层简图(据文献[27]修改)
Fig.2 Schematic stratigraphic column of the Pearl River Mouth Basin (modified after reference [27])

泛,东沙隆起北东—南西倾没构造特征使碳酸盐岩的生长向西迁移,缓坡逐渐向西进积和变陡,从而演变为一边相对陡峭的孤立台地,因而形成范围逐

渐缩小的相对晚期珠江组台地碳酸盐岩。

2 珠江组碳酸盐的主要岩石类型

根据岩心观察和薄片研究表明,珠江口盆地珠江组碳酸盐岩地层中主要发育由原地生长的生物构成岩石主体的生物灰岩(生物礁灰岩)及经过波浪和流水搬运、沉积的具有粒屑结构的碳酸盐岩两大岩石类型,而泥微晶结构的微晶或泥晶灰岩以及晶粒结构和各种残余结构的灰岩均不发育,同时珠江组碳酸盐旋回中缺乏蒸发盐,也缺乏泥微晶结构的白云岩,虽然在珠江口盆地珠江组下部地层中发育结晶白云岩,但是由于未取岩心,仅有极其有限的岩屑样品,无法进行更深入的研究。因此,将珠江口盆地珠江组碳酸盐岩划分为具生物格架结构的碳酸盐岩、具粒屑结构的碳酸盐岩和具泥微晶等其它结构的碳酸盐岩分别进行描述。

2.1 具生物骨架结构的碳酸盐岩

(1)造礁生物

珠江口盆地东沙隆起珠江组具生物骨架结构的碳酸盐岩主要是指生物礁灰岩,珊瑚和珊瑚藻是最为主要的造礁生物(图3-a, b)。构成生物礁骨架的珊瑚主要是原始骨骼矿物成分为文石质的六射珊瑚,包括顶孔珊瑚(滨珊瑚)、三星珊瑚、近星珊瑚、丘星珊瑚、脑纹珊瑚、柱孔珊瑚、星孔珊瑚等种属。珊瑚藻是珠江口盆地珠江组中分布最为广泛的造礁生物,主要包括标准的珊瑚藻、石枝藻、石孔藻、石叶藻、中叶藻等,具有壳状、枝状及其结壳状等形态特征。

(2)附礁生物

除了主要的造礁生物之外,附礁生物包括有孔虫(有浮游有孔虫和底栖有孔虫两大类)、苔藓虫、双壳、腹足、腕足、介形虫、绿藻、棘皮动物等。其中最为常见也最为重要的附礁生物是底栖大有孔虫及苔藓虫,底栖有孔虫常常参与珊瑚藻的造礁作用,与珊瑚藻相互缠绕,苔藓虫类的圆腔苔虫等属种参与造礁的作用与底栖大有孔虫类似,同样表现为二者之间互相包裹特征,其余的大多数附礁生物则主要表现为以碎屑形式充填在礁骨架间。

2.2 具粒屑结构的碳酸盐岩

珠江组具粒屑结构的碳酸盐岩的颗粒总量大多在50%以上,总体具有相对较高的泥晶基质含量

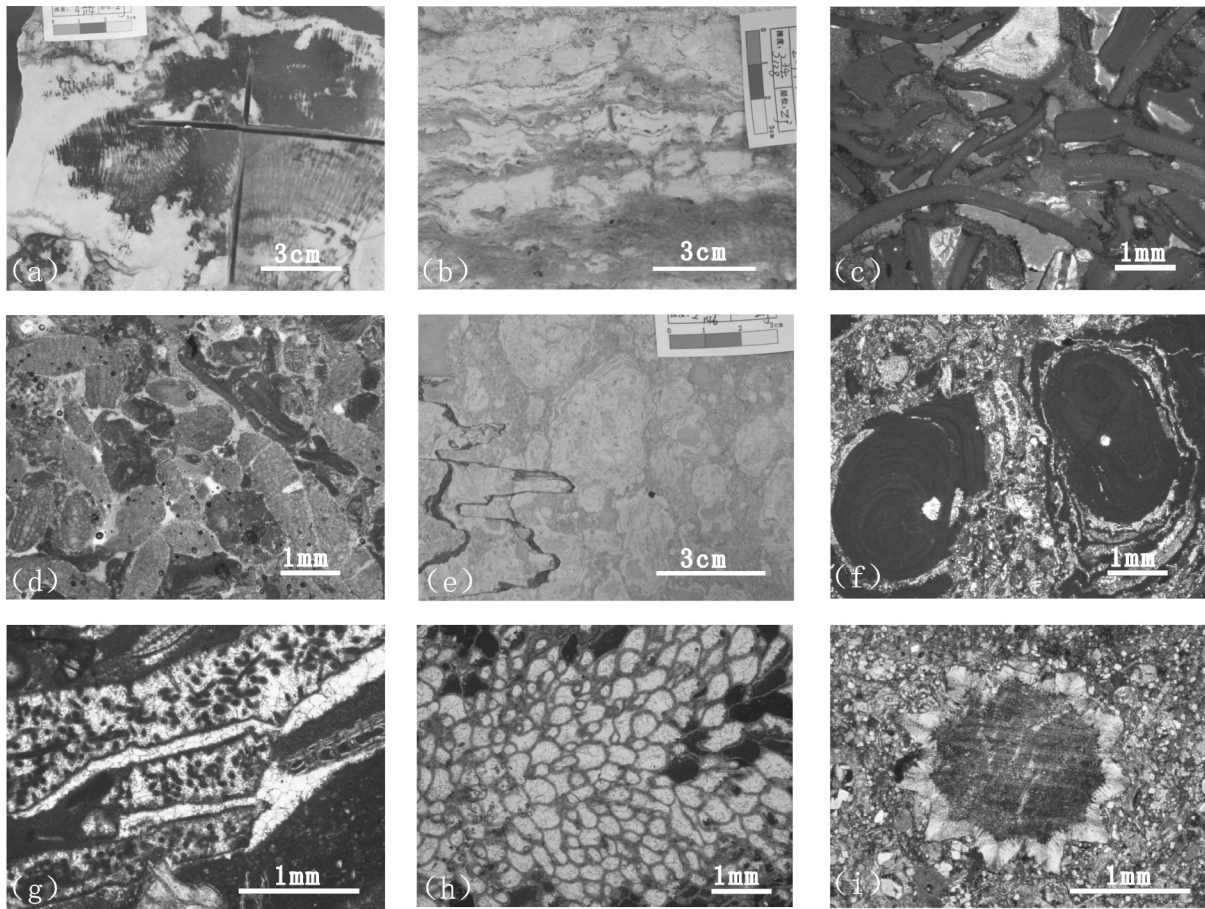


图3 珠江口盆地珠江组碳酸盐岩的主要造礁生物和生屑颗粒类型

- a—珊瑚礁灰岩,岩心照片,Y4-1井,1304.2 m;b—藻粘结作用,岩心照片,Y4-1井,1290.5~1293 m;c—生屑灰岩,颗粒以珊瑚藻屑为主,绿色铸体薄片,单偏光,Y1-3井,1227.7 m;d—有孔虫灰岩,以中歪虫(*Miogypsina* sp.)为主,蓝色铸体薄片,单偏光,Y2-1井,1305 m;
e—红藻石灰岩的岩心照片,红藻石呈球状、椭球状,岩石中发育缝合线,F13-2井,2516.3~2517.1 m;f—具包覆结构的红藻石,普通薄片,单偏光,F15-1井,1850 m;g—仙人掌藻(*Halimeda*)碎屑发生明显的重结晶作用,普通薄片,单偏光,Z32-1井,2178.5 m;
h—丽苔虫(*Callopora* sp.),体腔被重结晶方解石充填,普通薄片,单偏光,F15-1井,1832.08 m;
i—海胆棘刺的花瓣状构造及其单晶消光特征,蓝色铸体薄片,正交偏光,F15-1井,1864.5 m

Fig. 3 Main reef-building organisms and bioclasts of Zhujiang Formation in Pearl River Mouth Basin

- a—Reef limestone, core observation, Well Y4-1, 1304.2 m; b— The encrustation and bonding effects of coralline algae, core observation, Well Y4-1, 1290.5–1293 m; c— Bioclastic limestone, the main bioclasts are coralline algae fragments. Green epoxy impregnated, plainlight, Well Y1-3, 1227.7 m; d – Foraminifera limestone, showing that the main grains are foraminifera (*Miogypsina* sp.). Blue epoxy impregnated, stained by Alizarin red S, plainlight, Well Y2-1, 1305 m; e – The core photo of rhodolith limestone, showing the spherical and ellipsoid shape of rhodolith and stylolite developed in limestone, Well F13-2, 2516.3–2517.1 m; f – Rhodolith with encrusting structure, plainlight, Well F15-1, 1850 m; g – Obvious recrystallization of *Halimeda* fragments, plainlight, Well Z32-1, 2178.5 m; h – Bryozoan (*Callopora* sp.) with the body filled with recrystallized calcite, plainlight, Well F15-1, 1832.08 m; i – Petal-like crystal structure and extinction characteristics of echinoderms, blue epoxy impregnated, crossed nicols, Well F15-1, 1864.5 m

和相对较低的亮晶胶结物含量,绝大多数发育颗粒灰岩为主钻井的泥晶基质平均含量都在10%以上,可高达接近30%,而亮晶胶结物的平均含量均未超过10%且多数不到5%,但是亮晶胶结物含量变化在0~45%较大范围,部分样品中亦可观察到强烈的方解石胶结作用以致于几乎全部堵塞孔隙的情况。颗粒灰岩的颗粒类型主要以生物碎屑为主,由红藻

(珊瑚藻)屑以及红藻石、有孔虫、苔藓虫、珊瑚、绿藻、海绵、腕足、腹足、双壳、介形虫和棘屑等构成,其中红藻屑是最主要的颗粒类型,其次为有孔虫,个别钻井具有较高的苔藓虫、绿藻等生屑含量(图4)。

(1) 红藻屑

红藻屑(镜下鉴定主要为珊瑚藻屑)是研究区珠江组颗粒灰岩中广泛分布(在所有钻井中均有分

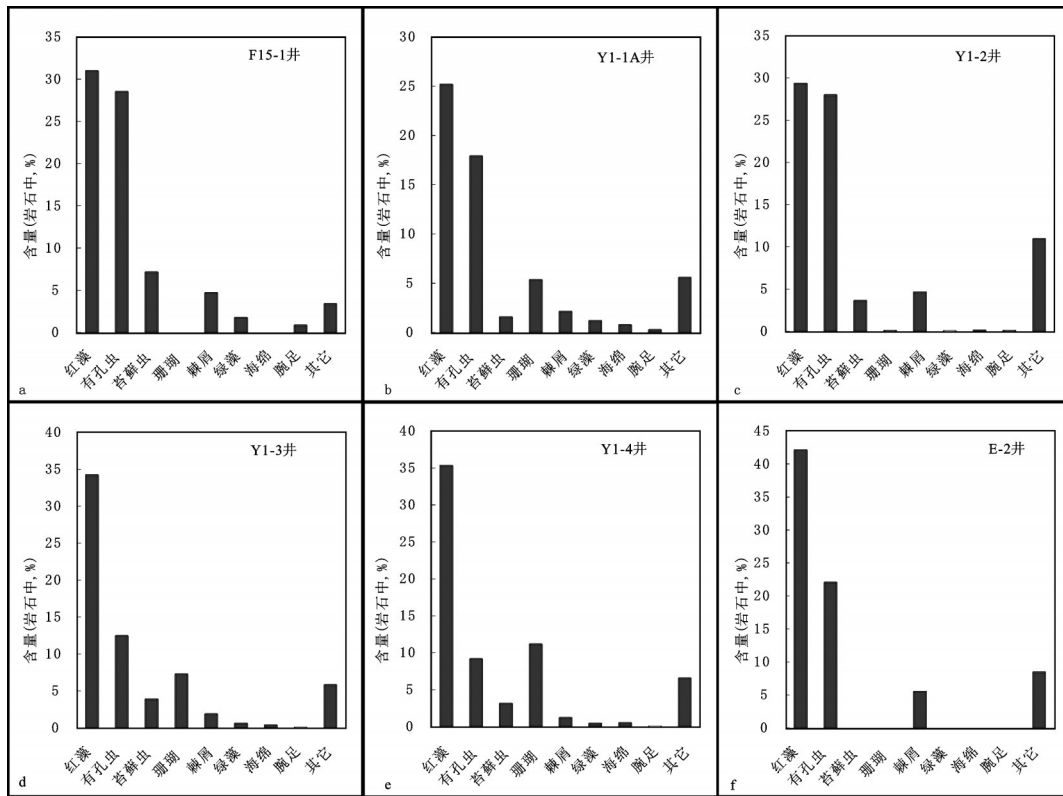


图4 珠江口盆地珠江组典型钻井中粒屑灰岩的颗粒成分分布直方图
Fig.4 Histograms of grain types of bioclastic limestone in typical wells of Zhujiang Formation

布),并且含量最高的颗粒类型(图3-c)。岩矿鉴定统计结果表明,大多数钻井中珠江组颗粒灰岩岩石中红藻屑的含量在30%以上,而就颗粒构成而言,一半以上的颗粒是由镁方解石质的红藻屑颗粒构成的,颗粒大小不等,构成泥晶或亮晶红藻屑灰岩。

(2)有孔虫

颗粒灰岩中有孔虫是仅次于珊瑚藻屑含量上屈居第二的生物,有孔虫常常与珊瑚藻屑共同构成颗粒灰岩的主体,也存在主要由有孔虫堆积而成的有孔虫颗粒灰岩(图3-d),有孔虫含量丰富,个体较大时(如鳞环虫的个体可达数厘米)在岩心上可观察到有孔虫之间错综交织的堆积形态。显微镜下观察到有孔虫主要包括 *Nephrolepidina* sp. 肾鳞虫、*Lepidocyclina* sp. 鳞环虫、*Miogypsina* sp. 中垩虫、*Miogypsinoides* sp. 似中垩虫、*Cycloclypeus* sp. 圆盾虫、*Amphistegina* sp. 双盖虫等底栖大型有孔虫种属,以及少量的 *Miliolids* 小粟虫类、*Textularid* 串珠虫类和 *Ammonids* 旋转壳类等底栖小型有孔虫,同时存在以抱球虫为主的浮游有孔虫。

(3)红藻石

红藻石 (rhodolith) 多为球状或椭球状等形态,一般形成于水体深度不大于100 m的非泥质海洋环境^[28],前人关于红藻石的定义和分类并未完全统一,如 Bosellini 和 Ginsburg (1971)^[29]最早把主要由珊瑚藻组成的结核形状的结壳和生长分枝称为红藻石; Peryt (1983)认为红藻石不仅可以由珊瑚藻形成,也可以由其他红藻形成,只是强调了红藻石的结壳状形态结构; Flügel (2004)^[30]从组成和形态两方面将主要由非固着的结壳钙质红藻构成的独立结核定义为红藻石。尽管如此,关于红藻石的认识日趋完善,以下两方面对于红藻石的认识是确定的:①红藻石的成因并非原地固着生物生长形成,往往是由非固着的珊瑚藻自身包裹或缠绕其他生物组成的;②需要强调红藻石的结核状的形态结构。因此,刘丽等 (2011)^[28]认为红藻石是由非固着的珊瑚藻构成的独立结核,可被划分到生物碎屑中。此次研究亦认为将红藻石归入到生物碎屑中比较妥当,将珠江口盆地珠江组中主要由珊瑚藻组成的呈球状、椭球

状的具包覆结构的结壳颗粒归为红藻石,从而区别于普通的珊瑚藻碎屑。红藻石的特征在岩心上尤其清晰可见(图3-e),薄片中也观察到由珊瑚藻或珊瑚藻包裹有孔虫或苔藓虫等生物组成的红藻石的结核状形态(薄片尺度观察到全貌的红藻石往往个体相对较小,称之为小红藻石,图3-f)。然而岩心上个体较大的红藻石颗粒(将其定义为大红藻石),在薄片尺度可能仅看到红藻石的一部分,往往会误将其定义为生物礁结构,因此需要将岩心观察和薄片分析相结合才能准确判断。由于薄片尺度的限制,岩矿鉴定中有时很难将红藻石的含量定量统计,因而虽然将红藻石作为单独的颗粒类型进行讨论,但在岩矿鉴定时将红藻石与普通珊瑚藻屑的含量一并进行估计。

(4) 绿藻

绿藻在研究区多数钻井取心段的铸体薄片分析中均可见到,但大多含量比较低,仅在少数钻井中作为除了珊瑚藻屑和有孔虫之外最为重要的颗粒类型,其在岩石中的含量可高达50%。珠江组碳酸盐岩中常见的绿藻为海松藻科的仙掌藻(*Halimeda*),原始矿物由文石组成,许多板状心形或次圆柱形节片构成仙人掌状,组成仙掌藻节片的细小的文石针晶体在死亡后可以分散进入沉积物中,为钙质软泥(泥晶灰岩)的主要来源。显微镜下观察到的珠江组碳酸盐岩中的仙掌藻均已发生成岩变化转变成了方解石或发生普遍的溶蚀作用。原始文石质骨骼的仙掌藻的新生变形作用(重结晶作用)表现为其胞间和髓部间隙被稍粗的方解石充填,因而蚀变后仍可辨认其原始的组织结构(图3-g)。发生强烈溶蚀的仙掌藻,尽管原始的文石矿物区已完全被溶蚀产生粒内孔隙,但通过其残存的孢子囊和颗粒轮廓依然可以识别。

(5) 苔藓虫

苔藓虫碎片也是珠江组碳酸盐岩中较为常见的颗粒类型(图3-h),显微镜下最常见的是 *Callopora* sp. 丽苔虫的生物碎片,可见到 *Cyclocolpota* sp. 圆腔苔虫、*Pleurozoon* sp. 肋苔虫 *Alveolaria* sp. 肺泡苔虫、*Cribrilaria* sp. 拟筛壁苔虫及其它难以判别其具体种属的苔藓虫碎屑。

(6) 棘屑

棘皮动物碎片在珠江口盆地研究区珠江组碳

酸盐岩中十分常见,其原始骨骼成分由高镁方解石构成,主要为海胆纲和海百合纲的生物碎屑,均具有典型的单晶消光特征,海胆棘刺圆切面中可观察到呈辐射对称的穿孔以及花瓣状构造(图3-i),海百合茎往往显示网格单晶特征。棘皮动物周围常常发育共轴增生方解石胶结物,有时可形成粗大的甚至是嵌晶结构的方解石胶结物,堵塞部分或全部的孔隙。

(7) 其他生屑

除了上述的生物碎屑类型之外,珠江组具粒屑结构的颗粒灰岩中还发育珊瑚屑、海绵屑、腕足、双壳、介形虫、腹足以及其他一些结构特征已难以识别的生物碎片等,但是相对而言,这些生物碎屑出现频率低,在颗粒构成中所占比重较小。

2.3 具其他结构的碳酸盐岩

珠江口盆地珠江组取心段的岩石类型主要为上述的具生物格架结构的生物礁灰岩和具粒屑结构的颗粒灰岩,其他结构类型的碳酸盐岩主要是指对于目前具有岩心或岩屑资料的钻井而言相对不发育的岩石类型或者不是常规的真正意义上的碳酸盐岩,主要包括有抱球虫“灰岩”、混积岩、泥微晶灰岩、结晶白云岩几类,在此不再做详细论述。

3 成岩环境的恢复

岩心观察、薄片分析以及阴极发光分析均未在珠江口盆地东沙隆起珠江灰岩中找到明显的暴露证据,也就是说,珠江组灰岩未经历典型的表生环境的成岩改造,通过不同的成岩组构特征的识别和研究表明近地表环境和埋藏环境是其经历的主要成岩环境。碳酸盐岩的成岩作用是一个非常复杂的过程,通过成岩组构的识别和综合的地质背景分析是本文恢复成岩环境的重要手段,然而,某些现今观察到的同一成岩组构可能产生于不同的成岩环境或者是经历了不同成岩环境的成岩作用改造的产物,如粒状亮晶方解石胶结物、世代生长的共轴加大边、溶解作用、示底构造等成岩组构所揭示的成岩环境很可能并不是唯一的,因而判别时需要结合地质背景等其他资料进行综合分析,前人对于区分和界定海水潜流、大气淡水渗流及潜流过程中产生的成岩作用及成岩组构特征等进行了较为系统的总结^[31],这也为本文成岩环境的划分提供了重

要的指导作用。

3.1 海水潜流环境

海水潜流环境是海相碳酸盐沉积后所经历的第一个成岩环境,亦是海相沉积物必然经历的成岩环境,海水潜流环境中有关组构的发育程度受海水活跃程度控制。珠江组碳酸盐岩中海水潜流环境的成岩组构广泛发育,主要有藻类的包壳作用以及藻类和生物之间的相互包裹作用、生物钻孔的发育、泥晶化作用、海绿石的形成、黄铁矿化作用以及胶结作用等。

(1)广泛发育的藻的包壳作用和藻类—生物的相互包裹作用(图5-a),显示生物礁较低速率的建造作用,藻的包壳作用代表生物成岩作用(生物岩化作用),包壳形成固结岩石,残余粒间或粒内孔可以得到保存。

(2)生物钻孔的发育。珠江组碳酸盐岩海水潜流环境中海绵以及软体动物等掘穴生物的钻孔作用非常普遍(图5-b),这些钻孔形态清晰,往往被灰泥或生物碎屑充填,钻孔垂直于生物或与生物斜交等情况均存在,强烈的钻孔(如在镜下可见到双壳生物中广泛发育的似网状生物钻孔,图5-b所示)和生物扰动作用会破坏岩石的原生沉积构造,重复的生物钻孔及其沉积物的充填作用可能改变甚至磨灭原始造礁生物骨架结构,产生含生屑泥晶灰岩的假象。此外,生物钻孔中常常具有示底构造特征,显示珠江组碳酸盐岩经历了广泛的海水成岩环境以及大气淡水成岩环境的成岩作用。

(3)泥晶化作用。珠江组碳酸盐岩中泥晶化作用较为发育,生物碎屑颗粒(如双壳、藻屑等)中常见泥晶化作用(图5-c)。泥晶化作用是停滞的海水潜流带的重要成岩作用,泥晶是生物的造泥作用,代表相对缓慢的沉积物堆积速度,这种沉积条件为藻类或真菌的穿孔作用提供了更为充足的时间。由于碳酸盐岩颗粒的泥晶化作用发生在海水中,因而泥晶套的原始矿物成分主要是文石和镁方解石,泥晶套因构成矿物的粒度细小和富有机质而具有很深的颜色。阴极发光分析表明,珠江组碳酸盐岩中发育的大多数泥晶套都具有相对很弱的阴极发光特征,其阴极发光强度只是略微强于被穿孔的藻屑等生物颗粒(图5-d),说明这些泥晶套记录了低Mn含量的海水特征。

(4)海绿石的形成。珠江口盆地珠江组中海绿石在海侵体系域最大海泛面附近大量出现,广泛充填在苔藓虫或有孔虫房室中(图5-e),同时碳酸盐岩台地消亡后的上覆地层中海绿石矿物广泛分布形成含海绿石泥岩甚至海绿石岩。海绿石的大量出现主要发育归于海水成岩环境,作为同沉积作用的产物。

(5)胶结作用。海水对文石、方解石、白云石等碳酸盐矿物是过饱和的,大多数碳酸盐沉积物的胶结作用均主要开始于海水潜流环境,因此胶结作用是海水潜流环境最为重要、最为发育的成岩作用。在海水潜流环境中,胶结作用主要发育在活跃的海水潜流带,这些环境具有较高的能量,台地边缘浅滩、台地边缘生物礁以及碳酸盐缓坡的近岸高能带都是胶结作用最为发育的环境,相对较低的碳酸盐沉积速度有利于胶结作用的进行。从矿物学角度来说,文石和镁方解石是最主要的碳酸盐矿物。南海珠江口盆地珠江组中发育的与海水潜流环境胶结作用有关的胶结物主要有以下的结构类型:

①等厚纤维状环边胶结物。粗粒的生物碎屑沉积后仍具有较高原生孔隙,自生物碎屑堆积作用以及珊瑚藻和珊瑚造礁作用发育开始,海水潜流环境则开始发育胶结作用,这可从等厚环边的胶结物特征中明显反映出来。等厚环边的方解石胶结物主要生长生物体腔孔和生物碎屑颗粒周围,最常见的是有孔虫及藻屑等碎屑颗粒周围发育的环边胶结物(图5-g)。通常情况下,早成岩胶结物往往沉淀于氧化环境而不具阴极发光。完全不具阴极发光以及岩石组构特征说明这些胶结物为早期海水胶结物(图5-j)。依稀可见的针状组构残余可能说明这些胶结物原始矿物的文石质成因。

②颗粒表面的刀刃状或叶片状胶结物。这是从海水中沉淀的常见的组构之一,往往生长在颗粒边缘(图5-h),代表原始镁方解石胶结物,由于其代表海水的低Mn含量而同样显示完全不具阴极发光的特征(图5-k),常常作为保持性成岩作用,使粒间孔隙以及生物体腔孔等得以保存。

③复三方偏三角面体(犬牙状)胶结物。犬牙状方解石(或称为马牙状方解石)胶结物常常充填于粒间孔、生物碎屑颗粒周围或生长在有孔虫和苔藓虫等生物体腔中,大多生长在不具阴极发光的等

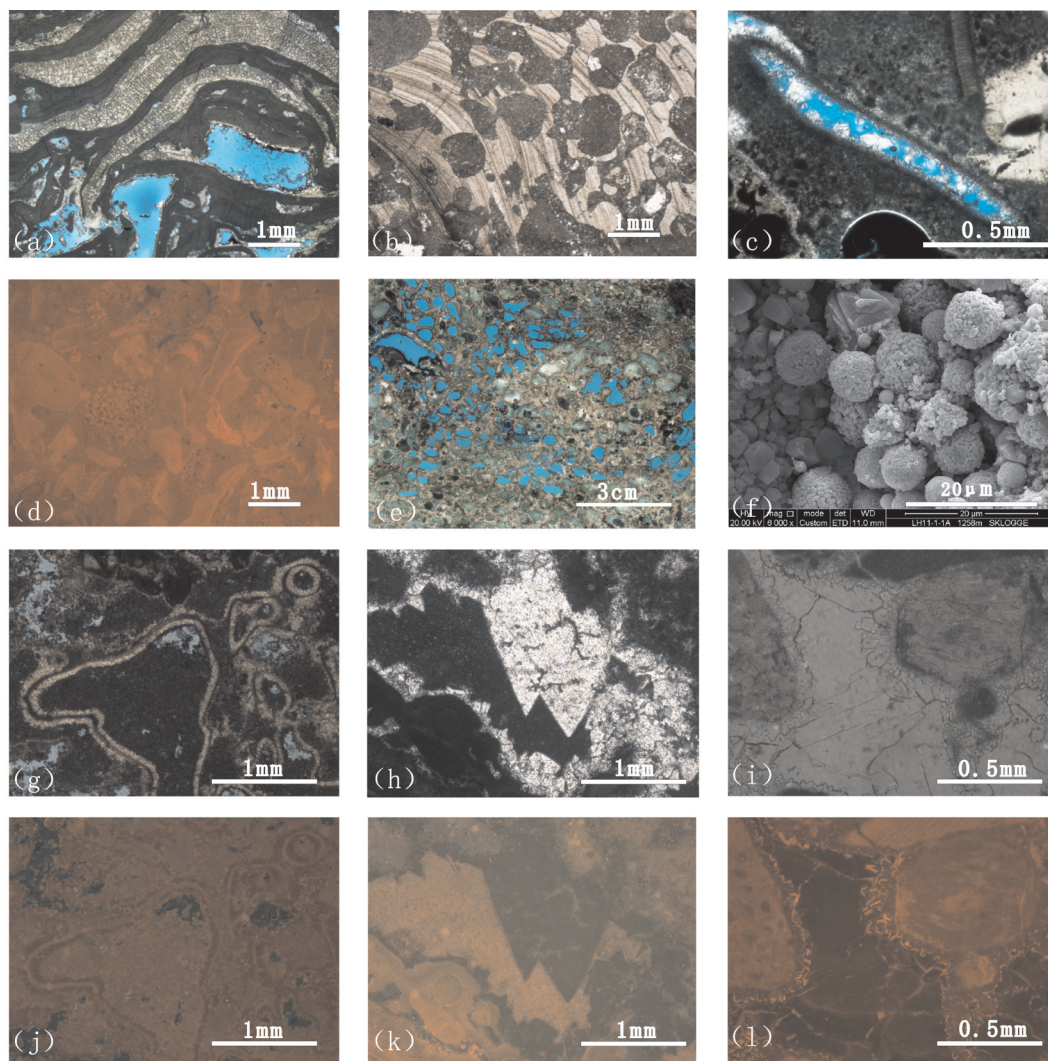


图5 海水潜流环境的主要成岩特征

a—珊瑚藻和有孔虫的相互包裹作用,发育藻架孔,蓝色铸体薄片,单偏光,Y1-1A井,1845.15 m;b—双壳中发育大量的生物钻孔,形成似网状结构,普通薄片,单偏光,Y4-1井,1245.3 m;c—双壳的泥晶化作用,双壳溶蚀孔中充填少量亮晶方解石胶结物,蓝色铸体薄片,单偏光,F15-1井,1832.08 m;d—藻屑的泥晶化作用,泥晶化边显示比藻屑颗粒稍强弱阴极发光特征,Y1-1A井,1244.1 m,阴极发光照片(阴极发光条件:束电压12 kV、束电流300 μ A,全文相同);e—部分苔藓虫体腔中充填绿色海绿石,蓝色铸体薄片,单偏光,F15-1井,1860.6 m;f—霉球状黄铁矿广泛分布,Y1-1A,1258 m,扫描电镜照片;g,j—显示纤维状环状方解石胶结物显示不发光的阴极发光特征,泥晶基质为极弱的阴极发光,Y1-3井,1243 m,g为蓝色铸体薄片的单偏光照片,j为g为对应的阴极发光照片;h,k—显示马牙状方解石胶结物完全不具阴极发光,Y1-1A井,1233.7 m,h为普通薄片的单偏光照片,k为h为对应的阴极发光照片;i,l—显示三期方解石胶结物不同的阴极发光特征,第一期纤维状方解石胶结物不具阴极发光,第二期马牙状方解石胶结物末端边缘显示明亮阴极发光,充填孔隙空间的第三期块状方解石胶结物几乎不具阴极发光,Y1-3井,1273.8 m,i为普通薄片的单偏光照片,l为i为对应的阴极发光

Fig. 5 Main diagenetic textures in marine phreatic environment

a—Mutual crusting effect between red algae and foraminifera, the development of skeleton pores of algae, blue epoxy impregnated, plainlight, Well Y1-1A, 1845.15 m; b—Lots of boring pores are developed in bivalve to form a mesh-like structure, plainlight, Well Y4-1, 1245.3 m; c—Early lithification of micrite and the formation of micrite envelope of bivalve, the dissolution pore filled with a small amount of calcite cement, blue epoxy impregnated, plainlight, Well F15-1, 1832.08 m; d—The micritization of algae, showing the micrite envelope with a little stronger cathodoluminescence than that of algae fragments. Cathodoluminescence conditions: beam voltage of 12 kV, beam current of 300 μ A (all cathodoluminescence microphotographs in the paper have the same conditions), Well Y1-1A, 1244.1 m; e—Some of Bryozoans body pores filled with glauconite, blue epoxy impregnated, plainlight, Well F15-1, 1860.6 m; f—Spherical pyrite is commonly distributed. Well Y1-1A, 1258 m, SEM; g,j—No visible cathodoluminescence of fringing fibrous calcite and very weak cathodoluminescence of matrix, Well Y1-3, 1243 m; g—Microphotograph impregnated by blue epoxy, plainlight; j—The corresponding cathodoluminescence microphotograph of g; h,k—Syntaxial calcite showing no visible cathodoluminescence, Well Y1-1A, 1233.7 m; h—Plainlight; k—The corresponding cathodoluminescence microphotograph of h; i,l—Different cathodoluminescence strengths of three stages of calcite cements. The first stage of fringing fibrous calcite with no visible cathodoluminescence, the end edge of the secondary stage of syntaxial calcite with bright cathodoluminescence, and the third blocky calcite filled in the pores with very weak cathodoluminescence. Well Y1-3, 1273.8 m; i—Plainlight; l—The corresponding cathodoluminescence microphotograph of i

厚环边胶结物之上(图5-i)。这种类型的胶结物显示出独具特色的具有不发光—极弱发光的核部和明亮的发光边(图5-l),阴极发光特征及其晶体形态说明其生长可能从海洋环境延续到埋藏条件,成岩流体性质的改变使其阴极发光具有类似于简单的环带状阴极发光特征。

④共轴生长方解石胶结物。共轴再生长胶结物也是珠江组碳酸盐岩中十分常见的胶结物组分,共轴胶结作用以棘皮动物的共轴加大为典型。早期的棘皮动物的共轴加大也可能发生在海水潜流环境,常常显示极弱或不发光的阴极发光特征。

3.2 淡水成岩环境

3.2.1 淡水潜流环境

在淡水潜流环境中,由于流体运移速度、流体的饱和程度、围岩的成分以及流体的化学性质都具有显著的多变性,因而淡水潜流环境的成岩作用是很复杂的。由于淡水潜流环境碳酸钙的饱和度显著大于其上的淡水渗流环境,因而胶结作用是淡水潜流环境最为重要的成岩作用,产生很大数量的胶结物,从矿物学上来说胶结物均为低镁方解石。珠江组碳酸盐岩中淡水潜流环境发育的成岩组构主要包括:

(1)粒状亮晶方解石胶结物。粒状结构的方解石是淡水潜流环境最常见的胶结物类型,多数情况下淡水潜流环境中流体的镁离子浓度仍显著低于海水,因而这些方解石基本上是等轴的。珠江组碳酸盐岩中粒状结构的方解石胶结物显示出具有比孔隙边缘生长海水成岩环境发育的纤维状和叶片状方解石更强的环带状阴极发光(图6-a,b),方解石胶结物的环带状阴极发光反映了孔隙流体的地球化学非均质性,显示低镁含量的大气淡水地球化学条件下的淡水胶结物生长特征。由于淡水潜流环境的胶结物通常具有较高的铁锰含量,因此具有相对较强的阴极发光性,同时由于其流体具有变化的 CaCO_3 饱和程度和结晶速度等因素的影响,会出现复杂的环带状阴极发光特征。此外,在淡水潜流环境中,近于等轴的粒状晶体经常从孔隙边缘向中心变大,这与晶体生长过程中对生长空间的竞争作用造成成核作用减少有关,同时也与岩石渗透率的随着胶结物的生长而逐渐降低有关,方解石连续的沉淀,孔隙将有可能完全被方解石胶结物堵塞,在

经历淡水潜流环境的胶结作用后,岩石虽然具有较大的负胶结物孔隙度,却仅保留很少的原生孔隙,亮晶方解石部分或完全封堵孔隙是造成岩石孔隙度降低的重要原因之一(图6c)。

(2)世代生长的共轴加大边胶结物。在珠江口盆地珠江组碳酸盐岩中单晶结构棘皮动物的共轴加大现象尤为普遍和常见(图6-d)。在薄片显微观察中,这些共轴生长的方解石通常比棘皮动物本身更加干净,共轴胶结物大量存在可以封堵全部孔隙。阴极发光分析表明,棘皮动物的共轴加大边(同时可能也包括已新生变形的棘皮动物本身)通常具有较高的锰含量而具有极强的阴极发光性(图6-e),显示这些次生加大作用是在淡水潜流环境中发生的,当然前面的分析可知,棘皮动物的生长可开始于海水潜流环境(图5-a,b;图6-i,l),阴极发光是区别不同成岩环境的棘皮动物的共轴加大的有效手段,不同成岩时期的共轴加大往往构成明暗交替的阴极发光特征。

(3)有限的溶解作用。淡水潜流环境的沉淀作用远比溶解作用发育,但也发育相对有限的溶解作用,使粒间孔、礁骨架孔和生物体腔孔等得以溶蚀扩大,同时淡水潜流环境的溶解作用往往表现为具有组构选择性溶解特征(图6-f),原始矿物成分为文石质的仙掌藻或六射珊瑚等生物往往被优先选择性被溶蚀而形成粒内溶孔,甚至形成铸模孔(有时仅剩由泥晶化边勾勒出的颗粒轮廓)。

3.2.2 淡水渗流环境

淡水渗流环境是处在地表之下地下潜水面之上的地带,该环境中碳酸盐沉积物的孔隙中充满空气和大气水,流体更趋向于对碳酸盐不饱和,因而溶解作用非常发育,虽然淡水渗流环境下部靠近淡水潜流环境的区域碳酸钙通产是饱和的,存在方解石的沉淀作用,但是相比较而言淡水渗流环境溶解作用比沉淀作用更为重要。珠江组碳酸盐岩中识别出的淡水渗流环境的成岩特征主要包括强烈的溶蚀作用(往往具非组构选择性溶蚀特征)以及示底构造的发育,同时也发育少量的微钟乳状和新月形胶结物。

(1)溶解作用

珠江口盆地珠江组碳酸盐岩在淡水渗流环境中经历的溶解作用主要表现为粒间溶蚀扩大孔、粒

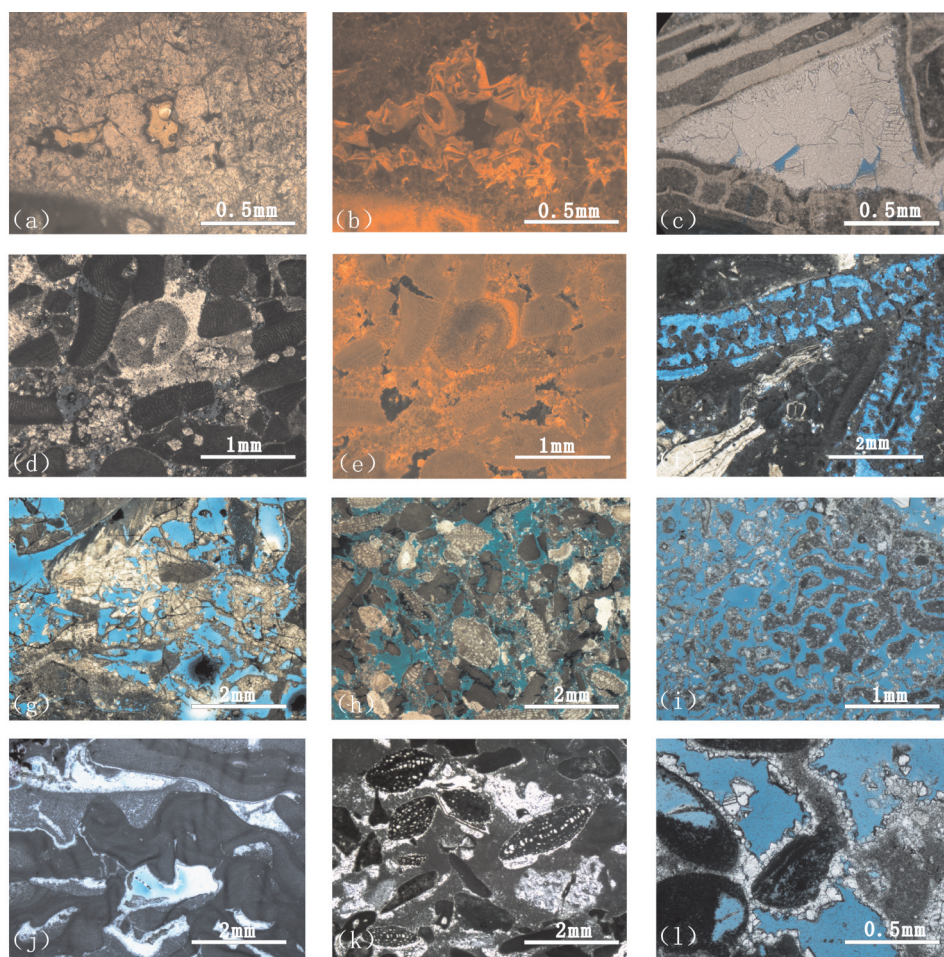


图6 淡水环境的主要成岩特征

a, b—向孔隙中心生长的等轴粒状方解石具有比孔隙边缘生长的纤维状和叶片状方解石更强的阴极发光, 具有流体性质变化所反映出的环带状阴极发光, 显示淡水胶结物的特征, Y4-1 井, 1309 m, a 为普通薄片的单偏光照片, b 为 a 对应的阴极发光照片; c—至少可识别出粒间孔隙边缘发育的二代生长的胶结物, 第一代在孔隙壁生长的纤维状胶结物, 其后为粒状方解石的发育, 等轴粒状的方解石具有逐渐向孔隙中心加大生长的特征, 并堵塞孔隙, 仅剩下少量的残余粒间孔, F15-1 井, 1832.45 m; d, e—棘皮动物的共轴加大显示出二代阴极发光特征, 第一代不具阴极发光, 第二代具有弱—中等阴极发光, Y18-1 井, 1379 m, d 为普通薄片的单偏光照片, e 为 d 对应的阴极发光照片; f—仙人掌的构造选择性溶解, 蓝色铸体薄片, 单偏光, Y18-2 井, 1413.28 m; g—强烈的溶解作用产生铸模孔、粒间溶蚀扩大孔, 具有明显的非构造选择性溶解特征, 蓝色铸体薄片, 单偏光, Y1-1A 井, 1227.2 m; h—强烈的溶蚀作用使得颗粒呈漂浮状, 原始的被溶组分已难以识别, 仅见少量的溶解残余呈细小颗粒状, 溶蚀作用使得粒间孔溶蚀扩大并且可能由于颗粒溶蚀殆尽的叠加作用, 粒间溶蚀孔远大于颗粒的大小, 绿色铸体薄片, 单偏光, Y1-3 井, 1282.8~1282.85 m; i—珊瑚骨架孔及其溶蚀扩大, 蓝色铸体薄片, 单偏光, Y1-1A 井, 1239.1 m; j—示底孔隙下部为泥微晶充填, 上部为无充填的孔隙, 蓝色铸体薄片, 单偏光, Z33-1 井, 2014 m; k—悬挂于颗粒底部的微型钟乳状胶结物, 普通薄片, 单偏光, Z33-1 井, 2013.65 m; l—粒状方解石构成新月形组构集中于颗粒接触处, 蓝色铸体薄片, 单偏光, Y1-1A 井, 1233.34 m

Fig. 6 Main diagenetic textures in fresh water environment

a, b—The isometric granular calcite growing toward the pore center with stronger cathodoluminescence than that of fringing fibrous calcite and bladed spar calcite distributed in the edge of pores, the zoned cathodoluminescence indicating the fluid change of cements developed in fresh water environment, Well Y4-1, 1309m. a—Plainlight; b—The corresponding cathodoluminescence microphotograph of (i); c—At least two generations of cements can be identified, wherein the first generation cements are developed along the pore walls and the secondary generation cements are granular calcite with crystals gradually increasing towards the pore center, thus only a small amount of residual inter-granular pores is left, Well F15-1, 1832.45 m; d, e—The coaxial growth of echinoderms showing the characteristics of two generations: the first generation has no visible cathodoluminescence whereas the secondary generation has weak to moderate cathodoluminescence, Well Y18-1, 1379 m. d—Plainlight; e—The corresponding cathodoluminescence microphotograph of d; f—Fabric selected dissolution of Halimeda, blue epoxy impregnated, plainlight, Well Y18-2, 1413.28 m; g—Non-fabric selective dissolution producing mold pore and the enlargement of intergranular dissolution pore, blue epoxy impregnated, plainlight, Well Y1-1A, 1227.2 m; h—Grains occur as floating-like distribution due to intensive dissolution, and the original compositions are difficult to distinguish. Intergranular pores are expanded by the dissolution and some grains are totally dissolved, so the diameter of intergranular dissolution pore is much larger than the grain size. Green epoxy impregnated, plainlight, Well Y1-3, 1282.8~1282.85 m; i—Coral skeleton pores, some are dissolved, blue epoxy impregnated, plainlight, Well Y1-1A, 1239.1 m; j—The lower part of geopetal pore is filled with micrite, and the upper part is pore without any fillings. Blue epoxy impregnated, plainlight, Well Z33-1, 2014 m; k—Micro-stalactitic cements suspended in the bottom of grains, Well Z33-1, 2013.65 m; l—The crescent fabric concentrated in the grain contacts, blue epoxy impregnated, plainlight, Well Y1-1A, 1233.34 m

内溶孔、铸模孔甚至超大孔的发育(图6-g,i),与淡水潜流环境的溶解作用的差别则主要表现为淡水渗流环境中的溶解作用可以具有非组构选择性的溶解特征,溶解更为强烈和彻底,甚至使得某些被溶组构已难以识别,更难以恢复。除了最常见到的粒间孔、生物骨架孔的溶蚀扩大以及无溶蚀残余而无从恢复其原始组构的超大孔等孔隙外,珠江组碳酸盐岩中可识别出最主要的被溶矿物是原始矿物为文石质的珊瑚和仙掌藻(图6-h,i),多数仙掌藻被强烈溶蚀后仅残余部分孢囊或者颗粒的轮廓,甚至仅残存少量泥晶或球粒状成分,通过岩石的整体面貌推测具有大量仙掌藻被溶蚀。

(2) 示底构造

示底构造的发育是淡水渗流环境成岩作用的常见物质表现形式,珠江口盆地珠江组碳酸盐岩中示底构造较为发育,镜下观察其主要特征表现为上部的亮晶方解石胶结物(或为无充填的孔隙)和下部的渗滤粘土或粉砂两部分组成(图6-j)。阴极发光分析表现为下部渗滤粘土或粉砂不具阴极发光或极弱阴极发光,而上部亮晶方解石显示桔红色的相对较强的明亮的阴极发光。

(3) 微型钟乳状胶结物

珠江组碳酸盐岩中可观察到少量的悬挂在颗粒下方的亮晶方解石胶结物(图6-k),可作为识别其经历淡水渗流环境成岩作用的标志之一。淡水渗流环境中水体的碳酸钙的饱和程度有限,因而胶结物仅分布在悬挂有水滴的碳酸盐岩颗粒的下方,形成与悬挂水滴类似的微型钟乳状胶结物,也称之为悬挂形胶结物或重力胶结物。

(4) 新月形胶结物

珠江组取心段碳酸盐岩中发育的新月形胶结物主要表现为粒状方解石集中分布在颗粒接触处(图6-l),类似于点焊式将碳酸盐岩颗粒连接在一起,胶结作用发生在压实作用之前,这样的点焊式的胶结作用使岩石的机械强度和抗压实能力增强,因而使得大多数的原生粒间孔得以保存,因此可以认为新月形胶结是一种利于原生孔隙保存的保持性成岩作用。

3.3 埋藏成岩环境

广义上来讲,碳酸盐岩的埋藏环境可以划分为浅埋藏环境和深埋藏环境,近地表成岩环境基本上

都属于浅埋藏环境,本文所指的埋藏环境主要是指中—深埋藏环境。目前关于浅埋藏和中—深埋藏环境的深度界限仍然存在争议,黄思静(2010)^[1]从成岩流体的化学角度出发,兼顾物理成岩作用的影响,建议将浅埋藏环境深度下限限制在600~1000 m的深度范围,前面讨论的海水潜流环境、淡水潜流环境和淡水渗流环境基本上都属于浅埋藏环境。珠江口盆地不同钻井揭示的珠江组埋深变化在1000多米至2000多米的范围内,珠江组碳酸盐岩地层不同程度地受到埋藏成岩作用的改造,埋藏环境的成岩特征主要表现以下几个方面。

(1) 物理(或机械)压实作用。埋藏成岩过程中的机械压实作用主要表现为塑性颗粒的变形作用和脆性颗粒的断裂作用以及微裂缝的发育(图7-a)。

(2) 化学压实作用。化学压实作用(或称之为压溶作用)典型表现为缝合线的发育和颗粒之间的凹凸—缝合线接触关系或者生物之间的齿状交互生长(图6-b)。岩心观察及其薄片的显微观察中均可见到珠江组碳酸盐岩中缝合线的发育(图3-e),其发育时间较晚,缝合线作用切断生屑颗粒甚至海水胶结物、马牙状胶结物和棘皮动物的同轴增生胶结物。压溶作用使得埋藏流体对于CaCO₃过饱和从而沉淀晚期胶结物,这导致缝合线附近的致密胶结作用,常常可见到沿缝合线发育的方解石和白云石的沉淀作用(图7-c,d)。

(3) 粒状—块状亮晶方解石。埋藏成岩作用过程中发育的方解石胶结物包括生长于孔隙中心的块状方解石(图5i),以及充填于裂缝中的粒状或块状方解石(图7-e),同时也包括碎屑颗粒断裂后发育的完全不具阴极发光的方解石胶结物(图7-f)和沿缝合线发育的粒状方解石(图7-c)。充填于孔隙中心的块状方解石晶体的生长晚于纤维状、等轴环边以及颗粒边缘的粒状胶结物,晶体较粗大,不具阴极发光或极弱阴极发光,同时块状亮晶方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值大致分布-8‰~-10‰的范围内,说明其具有较高的形成温度。胶结物形态和占位关系、茜素红S染色分析显示为淡紫色、较弱—不发光的阴极发光以及较低氧同位素值是判断其为埋藏胶结物的主要依据。

(4) 晚期溶蚀作用。埋藏成岩过程中晚期溶蚀作用产生的孔隙或者晚期溶蚀作用叠加在之前保

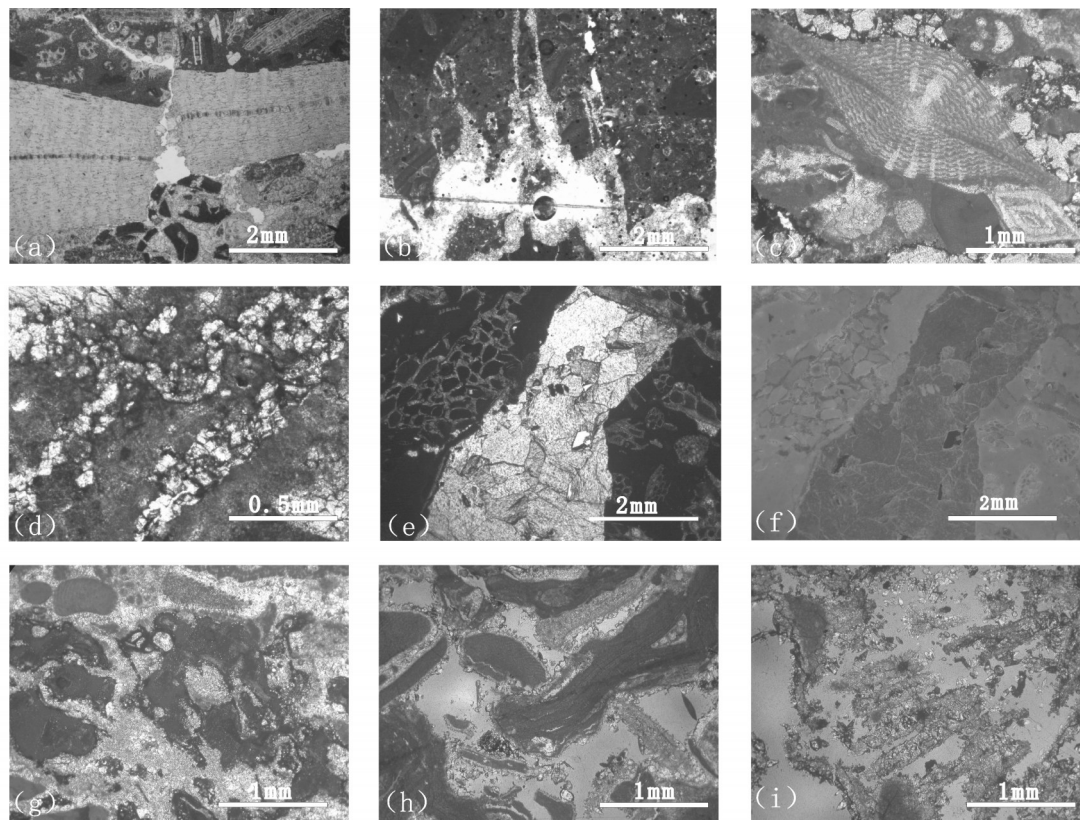


图7 埋藏环境的主要成岩特征

a—有孔虫压实断裂,发育晚期未充填的裂缝,普通薄片,单偏光,Z32-1井,2182.25 m;b—缝合线切穿泥晶基质和生屑颗粒,沿缝合线发育溶蚀孔隙,普通薄片,单偏光,Y1-4井,1335 m;c—沿缝合线发育的粒状方解石胶结物,普通薄片,正交偏光,Y1-1A井,1264.8 m;d—沿缝合线发育粉晶白云石,普通薄片,茜素红S染色,单偏光,Y1-3井,1276.3 m;e,f—充填于裂缝中的块状方解石不具阴极发光,F15-1井,1833.25 m;e—普通薄片的单偏光照片,f为e对应的阴极发光照片;g—完全不消光区域为孔隙,为沿缝合线发育或切割缝合线的溶蚀孔隙,具有超大孔特征,普通薄片,正交偏光,Y1-1A井,1234.1 m;h—后期强烈的溶蚀作用产生粒间溶孔甚至超大孔,可见环边胶结物压实断裂后的溶蚀特征,蓝色铸体薄片,单偏光,Y1-1A井,1253.72 m;i—珊瑚及其他生屑颗粒具有明显的断裂特征,孔隙壁无胶结物,溶蚀作用具有非组构选择性特征,受到埋藏期溶蚀作用的叠加改造,具有极大孔隙度的同时具有较好的渗透性,蓝色铸体薄片,单偏光,Y1-1A井,1248.43 m

Fig. 7 Main diagenetic textures in burial environment

a—Large foraminifera are cracked due to the compaction effect, and late unfilled fracture is developed. plainlight, Well Y1-4, 1335 m;
b—Stylolite cut through the micrite and bioclasts, and dissolution pores are developed along the stylolite, plainlight, Well Y1-1A, 1264.8 m;
c—Granular calcite cement are developed along the stylolite. Crossed nicols, Well Y1-3, 1276.3 m; e,f—Blocky calcite filled in the fracture shows no visible cathodoluminescence, Well F15-1, 1833.25 m; e—Plainlight; f— The corresponding cathodoluminescence microphotograph of e;
g—Dissolution pores along stylolite with no distinction showing the characteristics of superlarge pores, plainlight, Well Y1-1A, 1234.1 m;
h—Inter-granular dissolution pores and large pores are developed because of intensive dissolution that occurred after the cracks of fringing cements, blue epoxy impregnated, plainlight, Well Y1-1A, 1253.72 m; i—Coral and other grains show obvious fractured characteristics. No cements are developed along the pore walls. The non-fabric dissolution is printed by the burial dissolution. This sample has high degrees of porosity and permeability. Blue epoxy impregnated, plainlight, Well Y1-1A, 1248.43 m

存的原生孔隙和近地表成岩作用改造基础上的孔隙,大多表现孔隙壁无胶结物发育(图7-i),并且常常切穿碳酸盐岩颗粒和微裂缝或沿缝合线附近发育(图7-g),或嵌晶方解石被溶蚀等特征。同时,这些孔隙具有明显的溶蚀扩大,往往具有非组构选择性溶蚀特征(图7-h,i),甚至为晶洞孔切断颗粒的同时也切断成岩早期和埋藏胶结物。一些孔隙略微定向平行于红藻包壳,但是在局部切穿包壳红藻及其他生物。在某些情况下,晚期淋滤作用表现为

组构选择性溶解产生铸模孔或粒间溶蚀孔。原生粒间孔和早期铸模孔的溶蚀扩大及串通很可能是晚期淋滤作用叠加改造的结果。

(5) 油气侵位。许多晚期溶蚀孔隙中均有油气充填现象,表明油气侵位晚于溶蚀作用,或至少与溶蚀作用大致同期。

4 结论

珠口盆地珠江组碳酸盐岩主要包括具生物骨

架结构的生物礁灰岩和具粒屑结构的生屑灰岩两种类型,总体上是受到成岩改造的程度较弱,未见明显的表生暴露证据。通过不同成岩组构组合特征揭示不同的成岩环境分析显示,珠江组灰岩经历的主要成岩环境包括海水潜流环境、大气淡水渗流环境、大气淡水潜流环境和埋藏成岩环境。

海水潜流环境是珠江组灰岩经历的第一个也是最主要的成岩环境,该环境中发育的成岩作用主要有藻类的包壳作用以及藻类和生物之间的相互包裹和穿插作用、生物钻孔的发育、泥晶化作用、海绿石的形成、黄铁矿化作用、以及原始矿物主要为镁方解石的胶结作用(等厚纤维状环边胶结、叶片状胶结和马牙状胶结)。淡水潜流环境以粒状亮晶方解石胶结和棘皮动物的共轴加大为主,发育有限的溶解作用;淡水渗流环境则以非组构选择性的溶解作用最为特征,同时示底构造常见。压溶作用(化学压实作用)和作为压溶作用产物的缝合线的出现、沿缝合线的白云岩化作用、切穿生屑颗粒以及粒间胶结物的微裂隙的发育及其具嵌晶结构的等轴粗粒晶体的方解石胶结物是埋藏环境重要的成岩作用和物质表现。

参考文献(References):

- [1] 刘军, 施和生, 杜家元, 等. 东沙隆起台地生物礁、滩油藏成藏条件及勘探思路探讨[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(1): 22-27.
Liu Jun, Shi Hesheng, Du Jiayuan, et al. Forming conditions and exploration direction of reef oil gas pool in carbonate platform of Dongsha Massif[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(1): 22-27 (in Chinese with English abstract).
- [2] 周祖翼. 珠江口盆地的形成与南海的构造演化[J]. 海洋科学, 1993, (5): 62-66.
Zhou Zuyi. Basement structure and tectonic evolution of the Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Sciences, 1993, (5): 62-66 (in Chinese with English abstract).
- [3] 钟建强. 珠江口盆地的构造特征与盆地演化[J]. 海洋湖沼通报, 1994, (1): 1-8.
Zhong Jianqiang. Characteristics of geologic structure and basin evolution in Pearl River Mouth Basin[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1994, (1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [4] 于兴河, 梁金强, 方竞男, 等. 珠江口盆地深水区晚中新世以来构造沉降与似海底反射(BSR)分布的关系[J]. 古地理学报, 2012, 14(6): 787-800.
Yu Xinghe, Liang Jinqiang, Fang Jingnan, et al. Tectonic subsidence characteristics and its relationship to BSR distribution in deep water area of Pearl River Mouth Basin since the Late Miocene[J]. Journal of Paleogeography, 2012, 14(6): 787-800 (in Chinese with English abstract).
- [5] 陈汉宗, 吴湘杰, 周蒂, 等. 珠江口盆地新生代主要断裂特征和动力背景分析[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(2): 52-61.
Chen Hanzong, Wu Xiangjie, Zhou Di, et al. Meso-Cenozoic faults in Zhujiang River Mouth Basin and their geodynamic background[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(2): 52-61 (in Chinese with English abstract).
- [6] 孙龙涛, 陈长民, 詹文欢, 等. 珠江口盆地断层封堵特征及其影响因素[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 36-40.
Sun Longtao, Chen Changmin, Zhan Wenhuan, et al. Characteristics and influencing factors of fault sealing in Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 36-40 (in Chinese with English abstract).
- [7] 秦国权. 微体古生物在珠江口盆地新生代晚期层序地层学研究中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(4): 1-18.
Qin Guoquan. Application of micropaleontology to the sequence stratigraphic studies of late Cenozoic in the Zhujiang River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1996, 16(4): 1-18 (in Chinese with English abstract).
- [8] 黄虑生. 珠江口盆地第三系生物地层框架[J]. 中国海上油气(地质), 1999, 13(6): 406-415.
Huang Lvsheng. Tertiary biostratigraphic framework of Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1999, 13(6): 406-415 (in Chinese with English abstract).
- [9] 林景星, 张静, 姜仕军, 等. 南海珠江口盆地LH-19-4-1井新近纪有孔虫生物地层研究[J]. 地层学杂志, 2004, 28(2): 120-125.
Lin Jingxing, Zhang Jing, Jiang Shijun, et al. The Neogene foraminiferal stratigraphy of the LH-19-4-1 bore hole, Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. Journal of Stratigraphy, 2004, 28(2): 120-125 (in Chinese with English abstract).
- [10] 祝幼华, 陈芳. 珠江口盆地新近系钙质超微化石研究综述[J]. 微体古生物学报, 2007, 24(1): 76-81.
Zhu Youhua, Chen Fang. Review of the Neogene calcareous nannofossil research of the Pearl River Mouth Basin, South China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2007, 24(1): 76-81 (in Chinese with English abstract).
- [11] Story C, Peng P, Heubeck C, et al. An integrated geoscience and reservoir simulation study of the Liuhua 11-1 Field: South China Sea[C]//32nd Annual Offshore Technology Conference Transactions, Houston, 2000: 1-11.
- [12] Zampetti V, Sattler U, Braaksma H. Well log and seismic character of Liuhua 11-1 Field, South China Sea; relationship between diagenesis and seismic reflections. Sedimentary Geology, 2005, 175: 217-236.
- [13] 赵中贤, 周蒂, 廖杰. 珠江口盆地第三纪古地理及沉积演化[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(6): 52-60.
Zhao Zhongxian, Zhou Di, Liao Jie. Tertiary paleogeography and depositional evolution in the Pearl River Mouth Basin of the northern South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(6): 52-60 (in Chinese with English abstract).

- [14] 谢利华, 张博, 秦成岗, 等. 陆架坡折盆地强制海退及正常海退沉积——以珠江口盆地珠江组—韩江组为例[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1093–1100.
Xie Lihua, Zhang Bo, Qin Chenggang, et al. Forced regression and normal regression deposition of basin with continental shelf slope-break: A case study on Zhujiang and Hanjiang Formations of Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1093–1100 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王春修. 珠江口盆地海相中新统层序地层分析及其意义[J]. 中国海上油气(地质), 1996, 10(5): 279–288.
Wang Chunxiu. Sequence stratigraphic analysis of marine Miocene Formations in the Pearl River Mouth Basin and its significance[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1996, 10(5): 279–288 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈骥, 傅恒, 刘雁婷, 等. 珠江口盆地东沙隆起珠江组沉积环境及演化[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(2): 21–26.
Chen Ji, Fu Heng, Liu Yanting, et al. The sedimentary environment and evolution of Zhujiang Formation in Dongsha uplift of Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33(2): 21–26 (in Chinese with English abstract).
- [17] 黄海平, 傅恒, 周小康, 等. 珠江口盆地(东部)珠江组碳酸盐岩层序地层及储层分布[J]. 沉积学报, 2012, 30(2): 291–300.
Huang Haiping, Fu Heng, Zhou Xiaokang, et al. Sequence Stratigraphy and Reservoir Distribution of Carbonate of Zhujiang Formation in the Eastern Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(2): 291–300 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陈国威. 南海生物礁及礁油气藏形成的基本特征[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(7): 32–37.
Chen Guowei. Basic characteristics of formation of bioherm and reef oil-gas pools in the South China Sea[J]. *Marine Geology Letters*, 2003, 19(7): 32–37 (in Chinese with English abstract).
- [19] Sattler U, Zampetti V, Schlager W, et al. Late leaching under deep burial conditions: a case study from the Miocene Zhujiang Carbonate Reservoir, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21: 977–992.
- [20] 岳大力, 吴胜和, 林承焰, 等. 流花 11-1 油田礁灰岩油藏沉积—成岩演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 518–523.
Yue Dali, Wu Shenghe, Lin Chengyan, et al. Sedimentary and diagenetic evolution pattern of reef limestone reservoirs in Liuhua 11-1 Oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(4): 518–523 (in Chinese with English abstract).
- [21] 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, 19(5): 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, 19(5): 665–672 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王永凤, 王英民, 李冬, 等. 珠江口盆地储层特征[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(6): 952–960.
Wang Yongfeng, Wang Yingmin, Li Dong, et al. Characteristics of reservoirs in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2011, 46(6): 952–960 (in Chinese with English abstract).
- [23] 吴熙纯, 王权锋, Sun Shaoqing. 碳酸盐岩白垩状结构成岩环境及成因[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 1–16.
Wu Xichun, Wang Quanfeng, Sun Shaoqing. Chalky texture diagenetic environments and genesis of carbonate rocks[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(1): 1–16 (in Chinese with English abstract).
- [24] 吴熙纯, 王权锋, 李培华, 等. 南海早中新世东沙台地流花生物礁—滩组合的白垩状结构及白垩状孔隙储集层[J]. 古地理学报, 2010, 12(4): 451–466.
Wu Xichun, Wang Quanfeng, Li Peihua, et al. Chalky texture formation and chalky porous reservoir of Liuhua reef-bank complex on the Early Miocene Dongsha platform, South China Sea[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(4): 451–466 (in Chinese with English abstract).
- [25] 古莉, 胡光义, 罗文生, 等. 珠江口盆地流花油田新近系生物礁灰岩储层特征及成因分析[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 49–58.
Gu Li, Hu Guangyi, Luo Wensheng, et al. Characteristics and genesis of reservoir spaces in Neocene reef reservoir of Liuhua Oilfield, Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 49–58 (in Chinese with English abstract).
- [26] Sattler U, Immenhauser A, Schlager W, et al. Drowning history of a Miocene carbonate platform (Zhujiang Formation, South China Sea)[J]. *Sedimentary Geology*, 2009, 219: 318–331.
- [27] Zhu W L, Huang B J, Mi L J, et al. Geochemistry, origin, and deep-water exploration potential of natural gases in the Pearl River Mouth and Qiongdongnan basins, South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(6): 741–761.
- [28] 刘丽, 郭荣涛, 吴和源, 等. 红藻石和蓝藻石概念及分类归属的综述和修订[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 137–141.
Liu Li, Guo Rongtao, Wu Heyuan, et al. Review and modification of definition and classification of rhodoid and cyanoid[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(2): 137–141 (in Chinese with English abstract).
- [29] Bosellini A, Ginsburg R N. Form and Internal Structure of Recent Algal Nodules (Rhodolites) from Bermuda [J]. *The Journal of Geology*, 1971, 79(6): 669–682.
- [30] Flügel E. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application* [M]. Heidelberg: Springer, 2004: 44–63.
- [31] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 128–221.
Huang Sijing. *Carbonate diagenesis*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 128–221 (in Chinese).