第 27 卷　第 6 期
2025 年　12 月

古　地　理　学　报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 27　No. 6
Dec.　2025

**文章编号**：1671-1505(2025)06-1420-14　　**DOI**:10.7605/gdlxb.2025.095

# 巴西大坎波斯盆地早白垩世湖相碳酸盐沉积特征与模式*

张忠民[1]　张辛雨[2,3]　班舒悦[2,3]　李宗峰[2,3]　薛　军[2,3]
宿宇驰[2,3]　宋　健[2,3]　茆书巍[2,3]　鲍志东[2,3]

1 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院，北京 102206
2 中国石油大学（北京）地球科学学院，北京 102249
3 油气资源与工程全国重点实验室，中国石油大学（北京），北京 102249

**摘　要**　巴西东部大坎波斯盆地下白垩统盐下段油气资源丰富，但目前对该层系的沉积特征与演化方面的认识尚待深化。以大坎波斯盆地下白垩统巴雷姆阶—阿普特阶盐下段地层为研究对象，基于岩心、薄片、测井及地震等资料，结合前人研究，在目的层位中识别出 4 个层序界面，划分出 3 个三级层序；在层序地层格架内，对各体系域的沉积特征和演化过程分析表明，目的层系发育滨湖、浅湖、半深湖—深湖等沉积亚相，灰泥坪、滩后低能带、浅滩、生物礁、滩前高能带、滩前低能带、台间洼地、半深湖—深湖泥 8 类主要沉积微相。SQ1 层序主要发育在湖盆裂陷期，湖盆水深较深，多发育湖相孤立碳酸盐岩台地；SQ2 层序发育在断拗过渡期，孤立台地逐渐连接成片；SQ3 层序发育在拗陷期，湖盆水体变浅，由孤立逐渐连片的碳酸盐岩台地进一步拓展。大坎波斯盆地盐下段的沉积演化表明，早白垩世巴雷姆期—阿普特期，大坎波斯盆地水体逐渐变浅，早期的孤立碳酸盐岩台地逐渐连片发育，台地边缘的生物礁微相自拗陷期开始大规模发育。

**关键词**　湖相碳酸盐岩　沉积特征　沉积模式　白垩系　大坎波斯盆地　巴西

**第一作者简介**　张忠民，男，1971 年生，博士，2000 年毕业于中国石油大学（北京），教授级高级工程师，现从事油气地质勘探研究工作。E-mail：zzm.syky@sinopec.com。

**通讯作者简介**　张辛雨，男，1997 年生，博士研究生，主要从事沉积学及古地理学研究。E-mail：zhangxy.cup@163.com。班舒悦，女，1997 年生，博士研究生，主要从事油气与地热资源成藏与分布研究。E-mail：lillian-know@gmail.com。

**中图分类号**：P512.2　　**文献标志码**：A

# Sedimentary characteristics and models of the Early Cretaceous lacustrine carbonate rocks in Great Campos Basin, Brazil

ZHANG Zhongmin[1]　ZHANG Xinyu[2,3]　BAN Shuyue[2,3]　LI Zongfeng[2,3]　XUE Jun[2,3]
SU Yuchi[2,3]　SONG Jian[2,3]　MAO Shuwei[2,3]　BAO Zhidong[2,3]

1 *Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing* 102206, *China*
2 *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*
3 *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*

* 中国石油化工股份有限公司科技攻关课题（编号：P25150）和国家重点研发计划专项（编号：2017YFC0603104，2018YFC0604304）联合资助。[Co-funded by the Special Project of Sinopec Corporation (No. P25150) and National Key Research and Development Program of China (Nos. 2017YFC0603104, 2018YFC0604304)]

收稿日期：2025-05-07　　改回日期：2025-09-12

**Abstract**　The Lower Cretaceous pre-salt section of the Great Campos Basin in eastern Brazil is rich in oil and gas resources, however, the understanding of the sedimentary characteristics and evolution of the strata remains limited. Based on core, thin section, logging and seismic data, combined with previous studies, this paper takes the Lower Cretaceous Barremian-Aptian pre-salt strata of the Great Campos Basin as the research object. Four sequence boundaries were identified in the target horizon, and three third-order sequences were divided. Within the sequence stratigraphic framework, the sedimentary characteristics and evolutionary processes of each systems tract were analyzed. The results show that the target strata contain lacustrine, lakeshore, shallow-lake, semi-deep lake-deep, lake sedimentary subfacies, gray mud flat, low energy zone behind the beach, shoal, reef, high energy zone in front of the beach, low energy zone in front of the beach, inter-platform depression, semi-deep lake-deep lake mud. The SQ1 sequence mainly developed during the rifting stage of the lake basin. The lake basin was relatively deep and mostly developed isolated lacustrine carbonate platforms. The SQ2 sequence developed during the transitional stage from rifting to depression, during which the isolated platform gradually coalesced. The SQ3 sequence developed in the depression stage, when the water body of the lake basin became shallower and the carbonate platforms expanded from isolated to lately connected systems. The sedimentary evolution of the Pre-salt section in the Great Campos Basin indicates that during the Barremian-Aptian period of the Early Cretaceous, the water body of the Great Campos Basin gradually became shallower, and the early isolated carbonate platforms evolved into extensive connected platforms. The reef microfacies along the platform margins began to develop on a large scale from the depression stage onward.

**Key words**　lacustrine carbonate, sedimentary characteristics, sedimentary model, Cretaceous, Great Campos Basin, Brazil

**About the first author**　ZHANG Zhongmin, born in 1971, is a professorate senior engineer. He is mainly engaged in petroleum geology and exploration research. E-mail: zzm.syky@sinopec.com.

**About the corresponding authors**　ZHANG Xinyu, born in 1997, is a Ph.D. candidate. He is mainly engaged in sedimentology and palaeogeography. E-mail: zhangxy.cup@163.com. BAN Shuyue, born in 1997, is a Ph.D. candidate. She is mainly engaged in oil & gas and geothermal accumulation and evaluation. E-mail: lillianknow@gmail.com.

南美洲油气资源丰富，是中国油气公司海外勘探的核心区域。其中，巴西东部沿海的深水区拥有世界级的油气含量，该区域尤其主要富集于下白垩统巴雷姆阶-阿普特阶的盐岩层之下（刘深燕等，2011；马中振等，2011；史卜庆等，2021；鲍志东等，2024）。自 2006 年在桑托斯盆地发现了 Iula 特大型盐下碳酸盐岩油田之后，盐下段碳酸盐岩层系迎来了大规模的勘探。大坎波斯盆地成为了近 10 年来全球发现储量超过 $10\times10^8$ bbl 的超大型油气田最多的地区，展现出了巨大的勘探潜力（张忠民等，2020）。

湖相碳酸盐岩是大坎波斯盆地盐下段最主要的储集层岩石类型，其沉积微相研究与沉积模式的建立对盆地的未来勘探开发起到至关重要的作用，但目前研究程度还不足以支撑进一步勘探开发的需要。结合区域地质背景，基于岩心、薄片、测井、地震等数据，结合 IHS、C & C 数据库等资料，对研究区下白垩统盐下段碳酸盐岩进行层序地层划分，在等时地层格架内解析各层序沉积体系特征及其演化，进而建立沉积模式，以期为下一步勘探开发区块优选提供支撑数据。

## 1　区域地质背景

巴西东部海上的桑托斯（Santos）、坎波斯（Campos）和圣埃思皮里图（Espirito Santos）3 个盆地，由于地理位置相邻、地质特征相似，合称为大坎波斯盆地（Great Campos Basin）。其主体位于巴西东南海域水深 0～3000 m 的范围内，总面积约

为 58.68×10$^4$ km$^2$（图 1-a）（康洪全等，2016，2018；张忠民等，2020）。

大坎波斯盆地是典型的南大西洋被动边缘含盐盆地，自西向东可依次分为 4 个构造带，分别为近岸低凹带、中部低凸带、近海低凹带和外部高地带（王锦洲，2020）。桑托斯盆地外部高地带较宽、坎波斯盆地外部高地带较窄，而圣埃思皮里图盆地则基本不发育中部低凹带（图 1-b）。

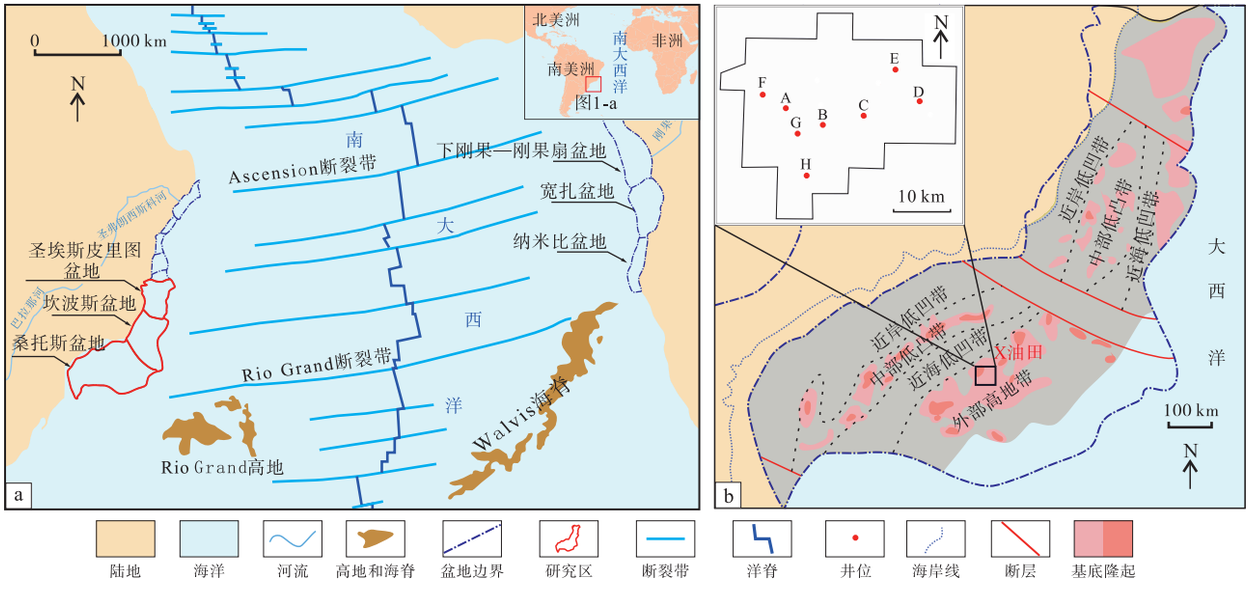
大坎波斯盆地主要经历了 3 个构造演化阶段：裂谷阶段、初始拉张阶段和大规模拉张阶段（图 2）（Moulin，2010；Blaich，2011；何娟等，2011；邬长武，2015）。早白垩世，冈瓦纳古大陆受 Tristan 热地幔柱作用，古南大西洋由南向北逐渐打开，期间玄武质泛流喷发形成的熔岩隆起和火山脊构成了一道天然屏障，将桑托斯盆地及以北的陆相断陷湖盆沉积体系与南部的大洋沉积体系分隔开（Stanton *et al.*，2014；张德民，2018）。大坎波斯盆地的基底为一套玄武岩（CAM），与上覆地层以裂陷初不整合面为界。在晚巴雷姆期—早阿普特期，整体发育于裂谷阶段，强烈的断裂活动促使大坎波斯盆地半地堑构造单元发育，形成一系列小型的冲积湖泊，主要沉积泥岩以及层纹石灰岩（PIC-ITP）；早阿普特期，区域性水退造成断块出露剥蚀，形成 DPA 区域不整合，标志着盆地进入热沉降阶段，持续沉降使得若干小型湖泊相互连通，并伴有短期海侵，盆地规模增大，形成 1 个统一的咸化拗陷湖盆（Thompson *et al.*，2015）；自 DPA 不整合面以上主要为发育在转换期的 1 套较厚的以湖相微生物碳酸盐岩为主的地层（BVE）；晚阿普特期层间发育 1 个区域性的不整合面 DIA。拗陷期末期气候干热，蒸发强烈，大规模沉积厚层盐岩；自阿尔布期开始海底持续扩张，盆地进入初始拉开阶段（Beglinger *et al.*，2012；朱石磊等，2017；Chafetz *et al.*，2018）。

## 2 层序地层格架

### 2.1 层序界面识别

在前人对大坎波斯盆地盐下段的层序划分方案的基础上（Christopher and Engene，2004），结合区域地层特征，综合岩性、电性、地震和区域沉积背景特征等相关数据，依据经典层序地层学理论，共识别出 4 个层序界面，分别为：130 Ma 的基底不整合、126 Ma 的 DPA 构造不整合、117 Ma 的 DIA 构造不整合及 112 Ma 盐岩底部不整合，显示大坎波斯盆地早白垩世盐下段共发育 3 个三级层序（图 3），整个沉积时限约为 18 Ma（Moreira *et al.*，2007）。

SB1 为裂陷初不整合面。其下伏地层为火山岩及变质岩等，上覆地层为盆地初始裂陷期的碎屑岩




a—地理位置图（据张忠民等，2020；有修改）；b—裂谷期构造分带图（据施昭彤，2018；有修改）

图 1 大坎波斯盆地位置及构造分带

Fig. 1 Location and tectonic zoning map in Great Campos Basin

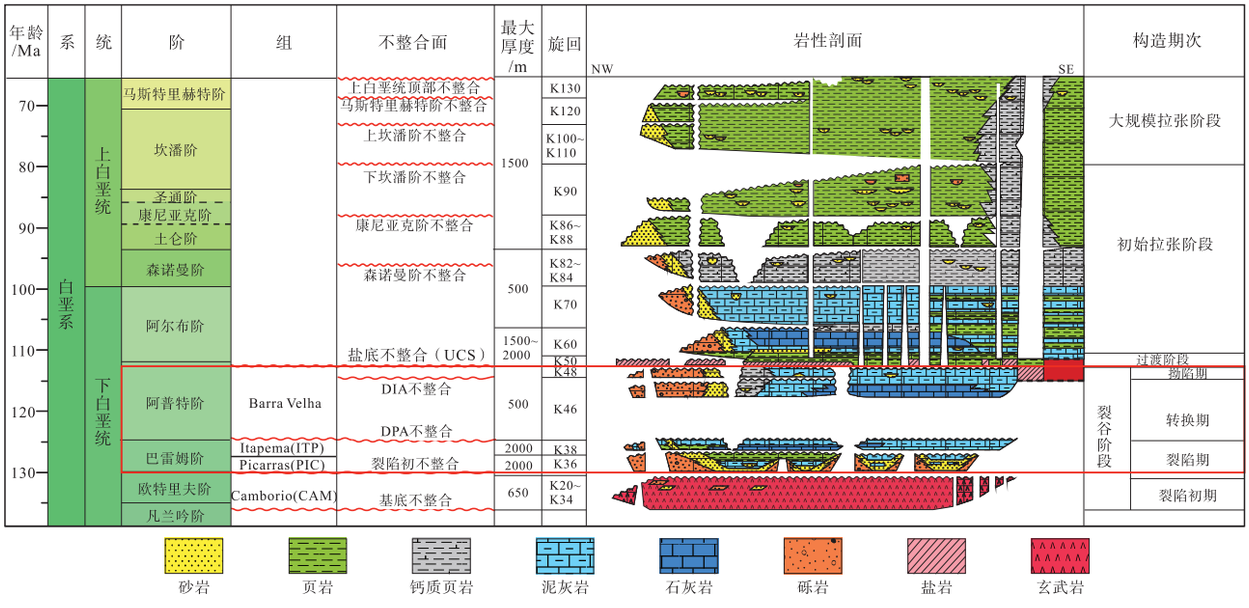



图 2　大坎波斯盆地白垩系地层综合柱状图（据 Moreira *et al.*, 2007；有修改）

Fig. 2　Stratigraphic column of the Cretaceous in Great Campos Basin (modified from Moreira *et al.*, 2007)

或者碳酸盐岩，为一个岩相转换界面，地震反射轴明显(图 4)。界面之上，AC、GR 测井曲线出现明显的正旋回特征，标志相对湖平面的上升(图 3)。

SB2 为构造不整合面 DPA。其下伏地层为盆地裂陷期碎屑岩—碳酸盐沉积，上覆地层为盆地构造转换期碳酸盐沉积；界面之上，AC、GR 测井曲线明显由高值变为低值(图 3)。

SB3 为构造不整合面 DIA。下伏地层为盆地转换期整体碳酸盐沉积，上覆地层为拗陷期整体碳酸盐沉积。岩性由下伏的层纹石灰岩转变为上覆的叠层石灰岩。地震剖面上，该界面下伏地层发生明显的削截，上覆地层常发生明显的上超(图 4)。

SB4 为盐岩底部不整合面。下伏地层为盆地拗陷晚期高能碳酸盐沉积，上覆地层为湖相的膏岩沉积，是一个岩相转换界面，标志着沉积环境发生剧烈变化；地震上显示为强反射(图 4)。

### 2.2　体系域特征

以 C 井为例(图 3)，该井未钻穿 CAM 层，SQ1 湖侵体系域上部由岩性主要为泥岩的 PIC 段构成，显示水体较深的低能环境；SQ1 湖退体系域由 ITP 段构成，下部岩性主体为泥岩与砂岩交互沉积，上部逐渐过渡为高能颗粒灰岩沉积，体现出水体由深变浅、能量由高变低的演化过程。SQ2 湖侵体系域由 BVE300L 段构成，岩性主要为层纹石灰岩，体现出水体较深的低能环境；SQ2 湖退体系域由 BVE300U 段构成，岩性主体为层纹石灰岩夹内碎屑颗粒灰岩，与 SQ2 湖侵体系域相比，显示水体逐渐变浅、能量逐渐变高的演化过程；SQ3 湖侵体系域由 BVE200 段构成，岩性主要为层纹石灰岩夹少量球状微生物灰岩、内碎屑颗粒灰岩及叠层石灰岩等，体现出水体整体较深的低能环境，存在部分水体震荡的沉积阶段；SQ3 湖退体系域由 BVE100 段构成，岩性主体为叠层石灰岩、砂屑灰岩、砾屑灰岩、球状微生物灰岩和少量层纹石灰岩，体现出水体较浅、能量较高的沉积环境。

## 3　沉积相类型及特征

基于大坎波斯盆地盐下段钻井岩心和薄片资料分析，并与典型海相碳酸盐岩对比表明，大坎波斯盆地盐下段碳酸盐岩中缺乏同期海相地层中常见的珊瑚、苔藓虫、海绵、海百合以及有孔虫等正常海相生物化石。区内地层中常见古生物包括双壳类、腹足类、藻类等(图 3)，其均为广盐度生物；且古生物分异度低，如双壳类仅见厚壳蛤（*Rudist*），其他种属双壳类均未见到，这一特征与现代湖泊碳酸盐岩有较强的可类比性（Neumann *et al.*, 2003）。大坎波斯盆地白垩系盐下段未见轮藻（*Charophytes*）等典型的淡水湖相生物，综合资料

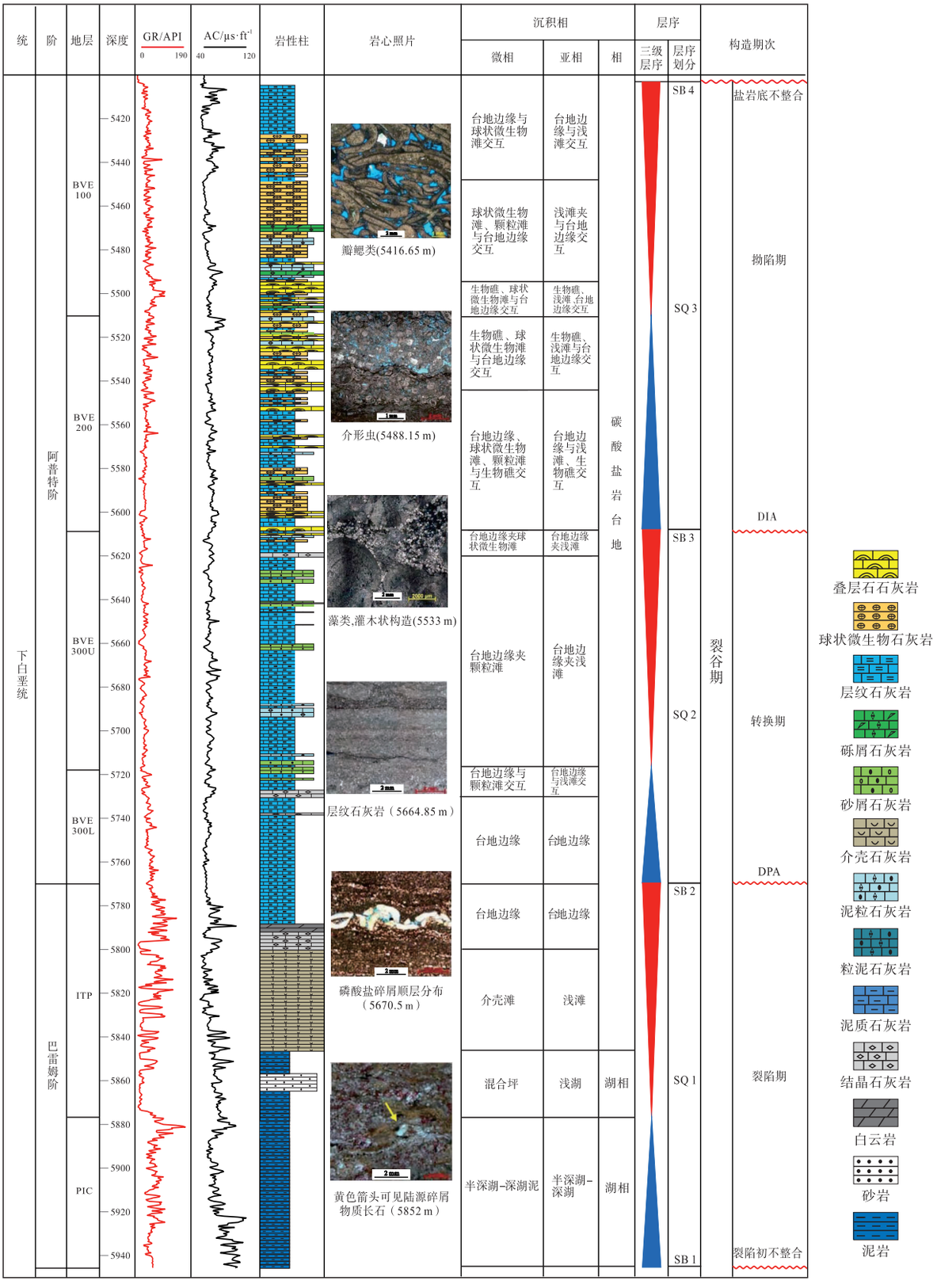



图 3 大坎波斯盆地 X 油田 C 井层序地层划分

Fig. 3 Sequence stratigraphic division scheme of Well C in X Oilfield, Great Campos Basin

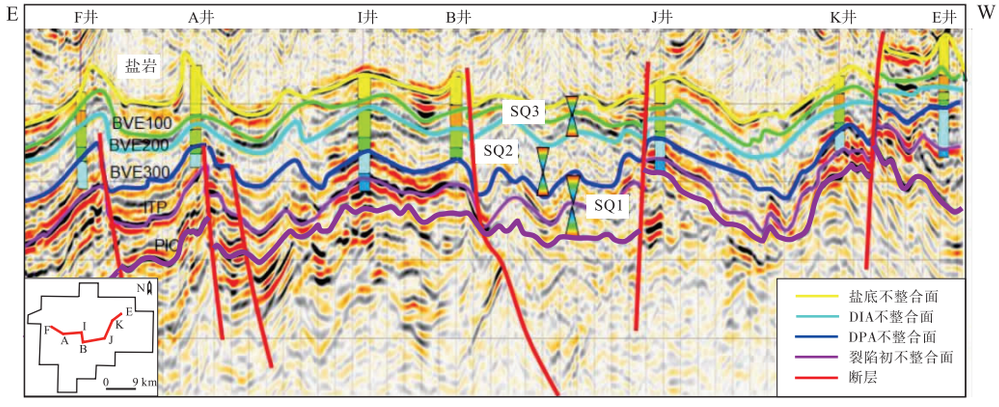



图 4　大坎波斯盆地 X 油田 E-W 向地震剖面图

Fig. 4　E-W seismic profile of X Oilfield, Great Campos Basin

反映盐下段为开放的咸水湖相沉积（Muniz and Bosence，2018）。

### 3.1　滨湖亚相

滨湖亚相整体分布较少，主要发育灰泥坪微相，岩性以浅灰—褐色的泥岩、层纹石灰岩和泥晶灰岩等为主，多发育交错层理、纹层理、窗格孔等沉积构造，反映水体整体浅、间或具有一定水动力条件的沉积环境(图 6-a)。

### 3.2　浅湖亚相

位于浅湖环境中的碳酸盐岩台地和台间洼地是区内重要的沉积相类型，碳酸盐岩台地亚相可以进一步划分为滩后低能带、浅滩、生物礁、滩前高能带、滩前低能带 5 种沉积微相(图 5)。

滩后低能带微相岩性以深灰色粒泥灰岩、微齿状—平滑状层纹石灰岩、泥晶灰岩为主，多发育平行层理，地震剖面上整体呈连续反射。反映了较弱的水动力环境(图 6-b)。

浅滩微相岩性以浅灰色内碎屑颗粒(砾屑/砂屑)石灰岩、鲕粒石灰岩、生物碎屑颗粒(介壳)石灰岩、泥粒灰岩及球状微生物石灰岩为主，发育块状构造；碎屑颗粒间多被亮晶方解石胶结，缺少泥质填隙物，反映较强的湖浪和湖流作用，为水体搅动强烈、能量较高的沉积环境；测井形态上常呈箱型，地震剖面上呈杂乱反射特征(图 6-c 至 6-g)。

生物礁微相以发育灰色树枝状—乔木状—灌木状叠层石石灰岩为主(图 6-h)，具有叠层构造，

**表 1　巴西大坎波斯盆地盐下段沉积微相类型及特征**

Table 1　Types and characteristics of sedimentary microfacies in the Pre-salt section of the Great Campos Basin, Brazil

| 沉积亚相 | | 沉积微相 | 岩石组合 | 颜色 | 沉积构造 | 测井及地震特征 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 滨湖 | | 灰泥坪 | 砂岩、泥岩、泥晶灰岩 | 浅灰、褐 | 交错层理、纹层理、窗格孔构造 | CGR 测井值较低 |
| 浅湖 | 碳酸盐岩台地 | 滩后低能带 | 粒泥灰岩、微齿状—平滑状层纹石灰岩、泥晶灰岩 | 深灰 | 平行层理 | 连续反射 |
| | | 浅滩 | 内碎屑颗粒(砾屑/砂屑)石灰岩、鲕粒石灰岩、生物碎屑颗粒(介壳)灰岩、球状微生物石灰岩 | 浅灰 | 块状构造 | 测井曲线呈箱型，杂乱反射 |
| | | 生物礁 | 树枝状—灌木状—乔木状叠层石石灰岩 | 灰 | 叠层构造 | 丘状反射 |
| | | 滩前高能带 | 泥粒灰岩、微齿状层纹石灰岩 | 灰 | 波状层理 | 连续—杂乱反射 |
| | | 滩前低能带 | 粒泥灰岩、平滑状层纹石灰岩、泥晶灰岩 | 深灰 | 平行层理 | 测井曲线漏斗型，连续反射 |
| | 浅湖台间洼地 | | 泥岩、泥晶灰岩 | 深灰—灰黑 | 平行层理 | 连续反射 |
| 半深湖—深湖 | | 半深湖—深湖灰泥 | 泥岩、泥晶灰岩 | 灰黑—黑 | 水平层理 | 连续反射 |

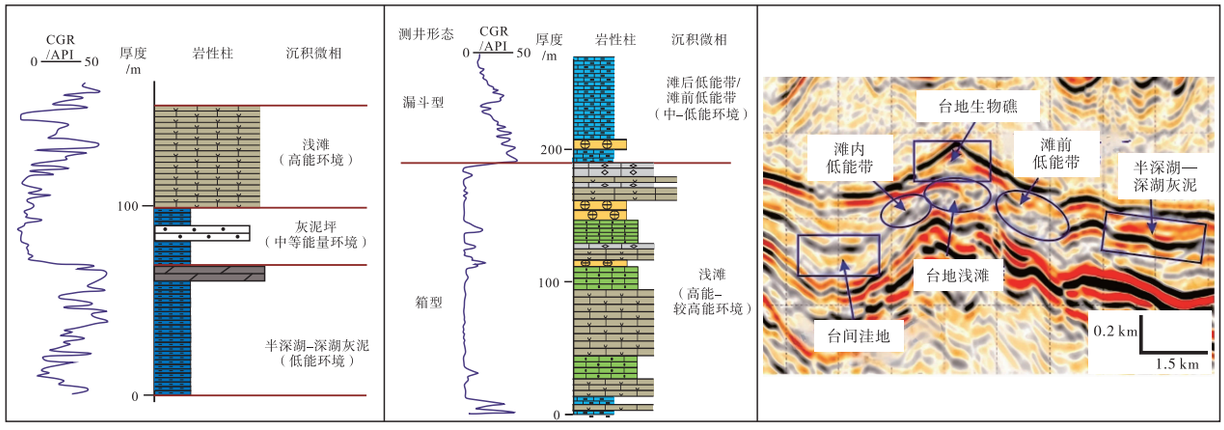
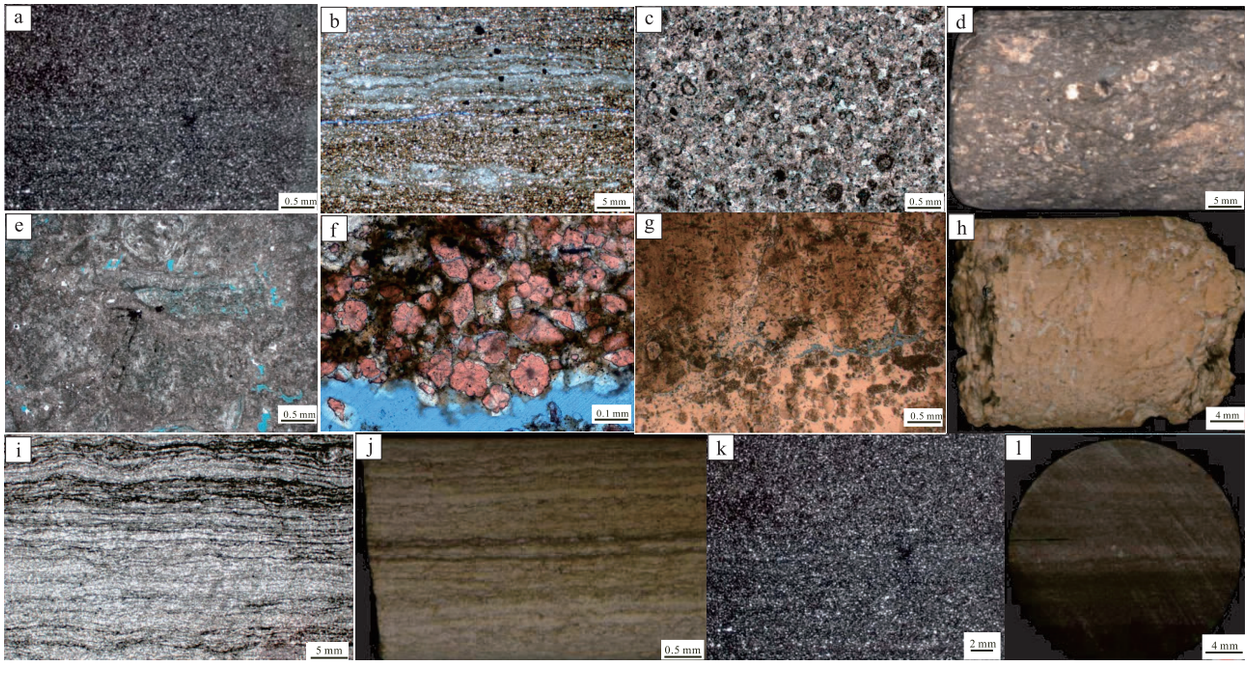



图 5 大坎波斯盆地盐下段主要沉积微相特征

Fig. 5 Main sedimentary microfacies characteristics of the pre-salt section in Great Campos Basin




a—泥晶灰岩，混合坪，I 井，井深 6139.10 m；b—微齿状层纹石灰岩，滩后低能带，J 井，井深 5290.10 m；c—鲕粒石灰岩，浅滩，I 井，井深 6699.00 m；d—砾屑灰岩，浅滩，岩心照片，A 井，井深 5258.50 m；e—介壳石灰岩，浅滩，K 井，井深 5894.00 m；f—球状微生物石灰岩，浅滩，I 井，井深 6641.00 m；g—球状微生物石灰岩，浅滩，K 井，井深 5780.00 m；h—叠层石石灰岩，生物礁，I 井，井深 6037.50 m；i—微齿状层纹石灰岩，滩前高能带，I 井，井深 5664.85 m；j—平滑状层纹石灰岩，滩前低能带，岩心照片，J 井，井深 5180.20 m；k—泥晶灰岩，台间洼地，I 井，井深 6673.00 m；l—泥岩，半深湖—深湖灰泥，岩心照片，L 井，井深 6031.5 m

图 6 大坎波斯盆地盐下段不同沉积微相典型岩石学特征

Fig. 6 Typical petrological characteristics of different sedimentary microfacies of the pre-salt section in Great Campos Basin

多形成于高能浅水环境；地震剖面上明显呈丘状反射特征。

滩前高能带微相岩性主要为灰色泥粒灰岩与微齿状层纹石灰岩等，为水体相对动荡环境，常发育波状纹层(图 6-i)，地震剖面上呈杂乱—连续反射。

滩前低能带微相以发育深灰色粒泥石灰岩、平滑状层纹石灰岩及泥晶灰岩等为主，常发育平行纹层(图 6-j)，水体能量较低，测井形态常呈漏斗型。

台间洼地微相以发育深灰—灰黑色泥岩、泥晶灰岩为主，多见平行层理(图 6-k)，形成于具有

一定水深、能量较低的环境；地震剖面上多呈连续反射特征。

### 3.3　半深湖—深湖亚相

该亚相主要包括半深湖—深湖灰泥（深水盆地）微相，岩性主要为灰黑色泥页岩及泥晶灰岩，多发育水平层理(图 6-l)。主要发育于坳陷中心部位，其水体安静且能量较低；地震剖面上多呈连续反射特征。

## 4　沉积相时空展布

### 4.1　剖面沉积相分析

通过选取重点井，构建近 E-W 方向及近 S-N 方向连井剖面，并进行沉积相分析，进而探究研究区沉积微相的空间展布。

#### 4.1.1　近东西向连井剖面

A 井-B 井-C 井-D 井-E 井剖面近东西向垂直横穿 X 油田碳酸盐岩台地(图 7)。

SQ1 湖退体系域，A 井与 B 井下部发育滩后低能带层纹石灰岩，C 井下部发育混合坪微相砂泥岩交互沉积、上部为浅滩微相内碎屑颗粒石灰岩沉积，D 井主体为层纹石灰岩沉积，E 井主体为浅滩微相内碎屑颗粒石灰岩沉积。SQ2 湖侵体系域，A 井主体为浅滩微相内碎屑颗粒石灰岩沉积，B 井与 C 井主体发育碳酸盐岩台地层纹石灰岩沉积，D 井发育浅滩微相砾屑石灰岩沉积，E 井主体为碳酸盐岩台地层纹石灰岩沉积。SQ2 湖退体系域，A 井、B 井及 C 井主体发育碳酸盐岩台地层纹石灰岩沉积，D 井发育浅滩微相内碎屑颗粒石灰岩沉积，E 井主体为碳酸盐岩台地层纹石灰岩沉积。SQ3 湖侵体系域，A 井与 B 井主体发育浅滩微相球状微生物石灰岩沉积，C 井主体为碳酸盐岩台地层纹石灰岩沉积，D 井发育浅滩微相内碎屑颗粒石灰岩及球状微生物石灰岩沉积，E 井下部主体发育浅滩微相球状微生物石灰岩沉积、上部主体为生物礁微相叠层石石灰岩沉积。SQ3 湖退体系域，A 井主体为生物礁微相叠层石石灰岩与浅滩微相内碎屑颗粒石灰岩及球状微生物石灰岩沉积，B 井与 C 井下部主体为生物礁微相叠层石石灰岩沉积、上部主体为浅滩微相球状微生物石灰岩沉积，D 井主体为浅滩微相球状微生物石灰岩、内碎屑颗粒石灰岩沉积，E 井主体为滩前高能带微相的角砾灰岩沉积、上部主体为生物礁微相的叠层石石灰岩沉积。

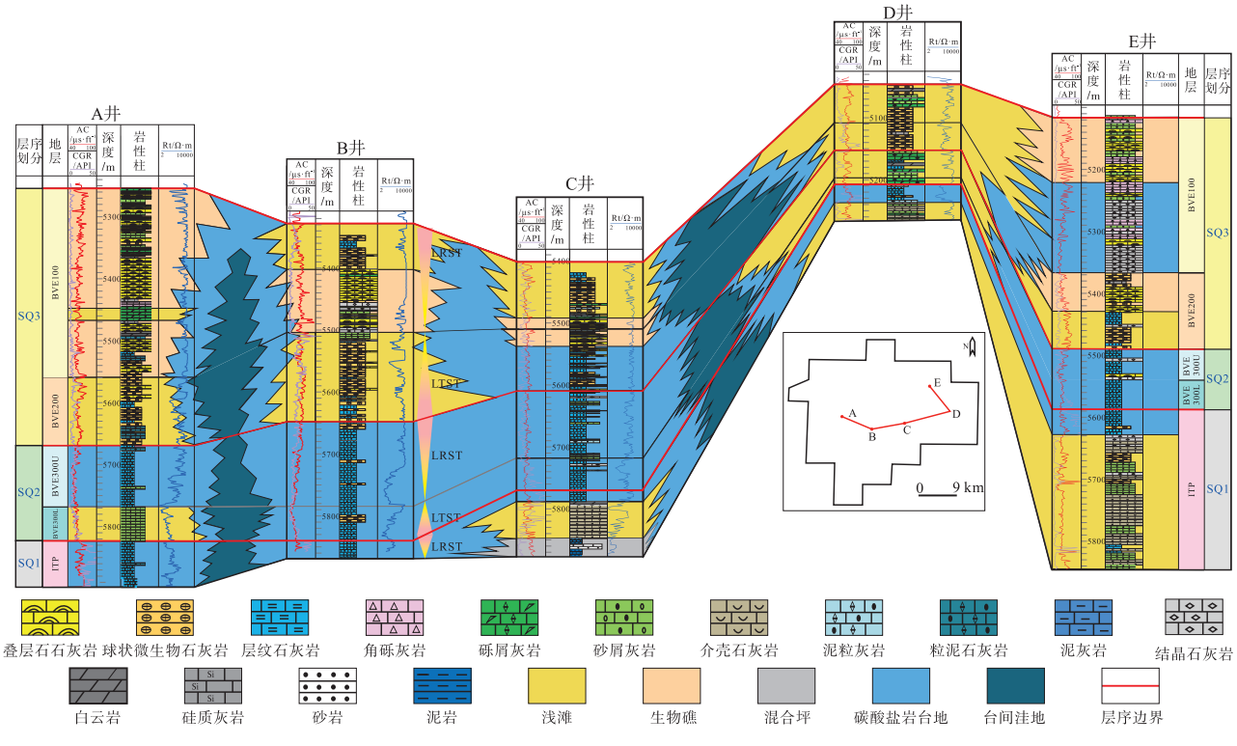



图 7　大坎波斯盆地 X 油田近 E-W 向沉积相连井对比图

Fig. 7　Well correlation along a nearly E-W sedimentary section in X Oilfield, Great Campos Basin

整体上，自东向西，X 油田盐下段内部发育 3 个碳酸盐岩台地，分别为 A 井区一带的西部碳酸盐岩台地、B 井—C 井一带的中部碳酸盐岩台地及 D 井—E 井一带的东部碳酸盐岩台地，台地间被台间洼地分割开。SQ1 湖退体系域自下而上台间洼地的规模有所减小；SQ2 湖侵体系域至 SQ2 湖退体系域，台间洼地的规模逐渐变大再变小；SQ3 湖侵体系域至 SQ3 湖退体系域，台间洼地的规模经历由小变大再变小的演化过程。自 SQ1 湖退体系域到 SQ2 至 SQ3，碳酸盐岩台地由孤立台地逐渐连片演化，体现出水体逐渐变浅的演化过程，反映出研究区自裂陷期至拗陷期，水体逐渐变浅的演化过程。

#### 4.1.2 近南北向连井剖面

F 井-A 井-G 井-H 井剖面近南北向平行穿过 X 油田西部碳酸盐岩台地(图 8)。

SQ1 湖退体系域，F 井、A 井及 G 井主体发育碳酸盐岩台地层纹石灰岩沉积。

SQ2 湖侵体系域，F 井与 G 井主体发育碳酸盐岩台地层纹石灰岩沉积，A 井主体发育浅滩微相的内碎屑颗粒石灰岩。

SQ2 湖退体系域，F 井与 G 井主体发育浅滩微相的球状微生物石灰岩夹部分内碎屑颗粒石灰岩沉积，A 井与 H 井主体发育碳酸盐岩台地层纹石灰岩沉积。

SQ3 湖侵体系域，F 井、A 井及 G 井主体发育浅滩微相的球状微生物石灰岩沉积，H 井主体发育碳酸盐岩台地层纹石灰岩沉积。

SQ3 湖退体系域，F 井主体发育浅滩微相的球状微生物石灰岩沉积，A 井主体为生物礁微相叠层石石灰岩夹浅滩微相内碎屑颗粒石灰岩及球状微生物石灰岩沉积，G 井下部发育生物礁微相的叠层石石灰岩沉积、上部整体发育碳酸盐岩台地层纹石灰岩沉积，H 井下部整体发育碳酸盐岩台地层纹石灰岩沉积、上部整体发育浅滩微相的球状微生物石灰岩沉积。

剖面分析显示，在整体上，在 X 油田盐下段沉积期，西部发育碳酸盐岩台地，下部以水体相对较深的碳酸盐岩台地层纹石灰岩沉积为主，上部以水体相对较浅的浅滩微相的内碎屑颗粒石灰岩及生物礁微相的叠层石石灰岩沉积为主。反映出研究区

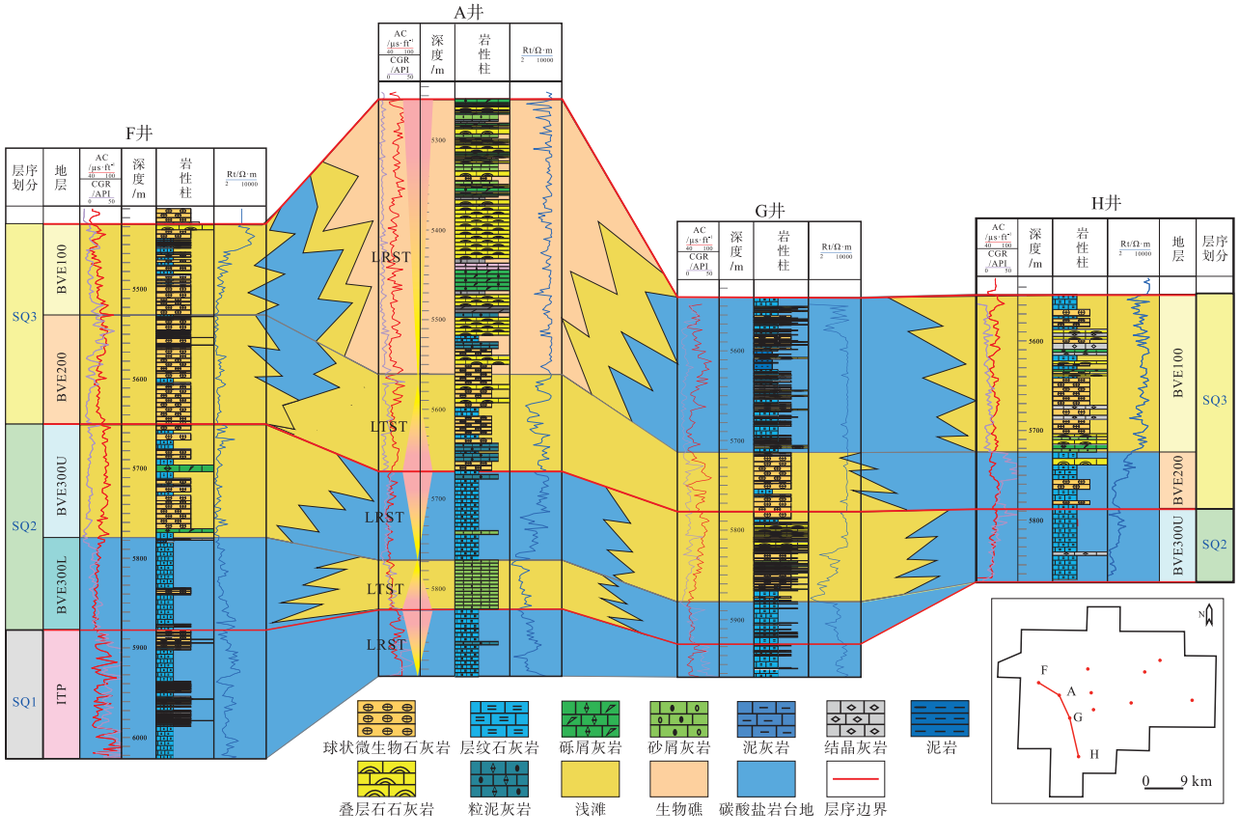



图 8 巴西 X 油田近 S-N 向沉积相连井对比图

Fig. 8 Well correlation along a nearly S-N sedimentary section in X Oilfield, Brazil

自裂陷期至坳陷期，水体自下而上逐渐变浅的演化过程。

## 4.2　平面展布特征

### 4.2.1　SQ1 湖退体系域

SQ1 湖退体系域时期，大坎波斯盆地主要发育有三角洲相、滨湖亚相、浅湖亚相、碳酸盐岩台地相、介壳滩微相及半深湖—深湖亚相(图 9-a)。其中，三角洲相主要发育于盆地的西北部靠近物源一侧，且分布范围较小；滨湖亚相也发育于盆地西北部靠物源一侧，沿北东—南西向呈带状展布，紧邻浅湖亚相分布，分布范围也较小；而浅湖亚相的分布范围则相对较广，面积约为盆地的 1/3 左右，在区内整体沿北东—南西向呈带状展布，且自北西—南东向表现为间歇式分布的特点。浅湖亚相沉积的区域发育有一系列沿北东—南西向呈零星带状分

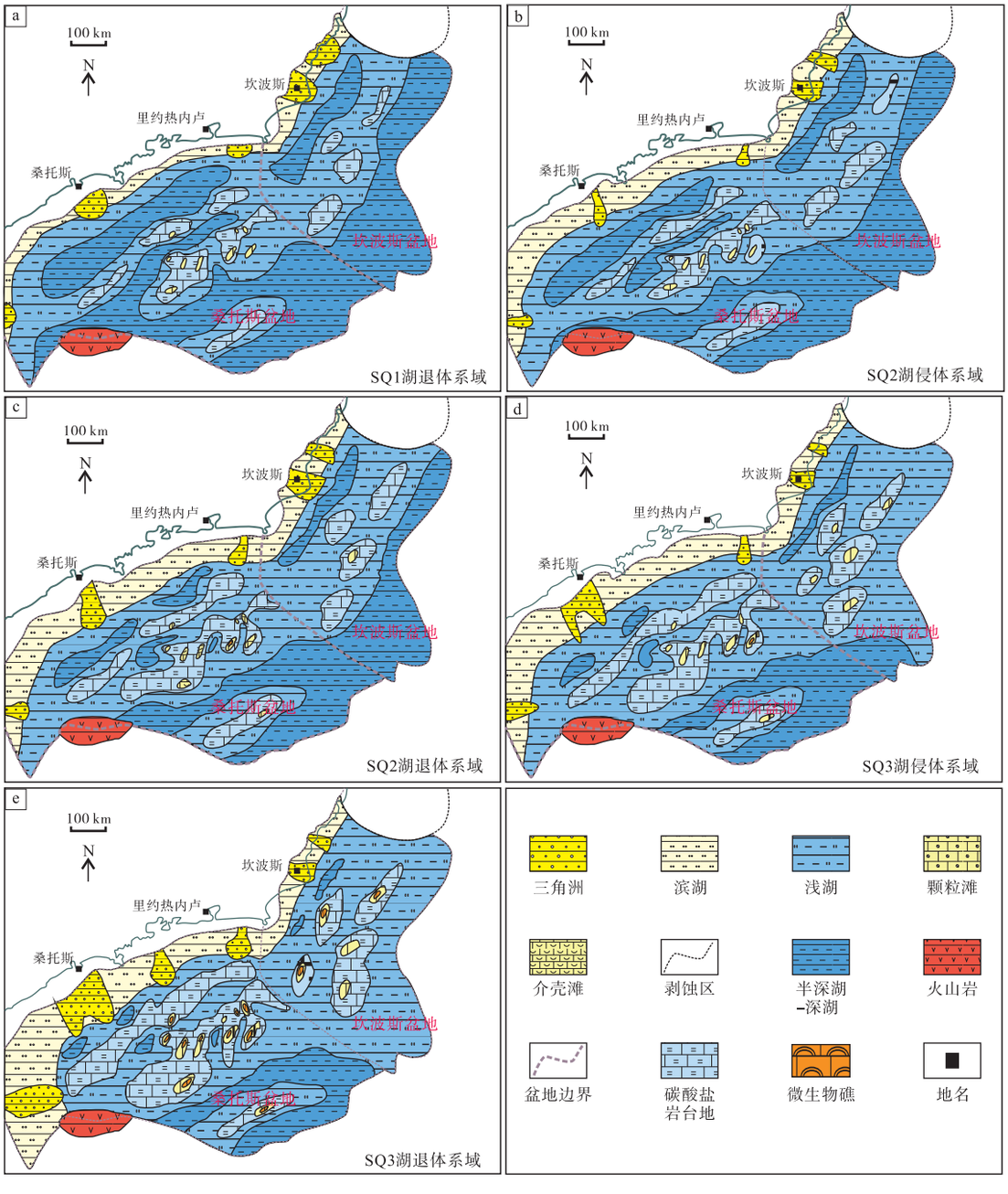



图 9　大坎波斯盆地早白垩世巴雷姆期—阿普特期岩相古地理图

Fig. 9　Lithofacies palaeogeographic map of the Early Cretaceous Barremian-Aptian in Great Campos Basin

布的碳酸盐岩台地，它的分布面积不大，多远离物源区沉积，且其内部发育有许多孤立的介壳滩微相，主要集中分布在盆地南西至中部的碳酸盐岩台地相带中。此外，盆地内分布最广泛的为半深湖—深湖亚相，超过盆地面积的一半左右，主要沉积一些细粒沉积物。整体上，SQ1 湖退体系域沉积期，盆地水体尚较深，物源供应较充足，致使三角洲相及半深湖—深湖亚相较为发育。

#### 4.2.2 SQ2 湖侵体系域

大坎波斯盆地在 SQ2 湖侵体系域时期发育有三角洲相、滨湖亚相、浅湖亚相、碳酸盐岩台地相、颗粒滩微相及半深湖—深湖亚相。与 SQ1 湖退体系域时期相比，SQ2 湖侵体系域时期浅湖亚相与碳酸盐岩台地相带的沉积范围有所增加，且连通性变好。另外，在碳酸盐岩台地中分布有许多孤立的颗粒滩微相，主要集中分布在盆地南西至中部处的碳酸盐岩台地相带中，面积较小。整体上，SQ2 湖侵体系域沉积时的水体深度较 SQ1 湖退体系域沉积时的水体深度浅(图 9-b)。

#### 4.2.3 SQ2 湖退体系域

大坎波斯盆地 SQ2 湖退体系域时期的沉积体系基本继承了 SQ2 湖侵体系域时期的沉积体系特征，但由于沉积水体的逐渐变浅，SQ2 湖退体系域时期三角洲相更为发育，滨浅湖亚相和碳酸盐岩台地相带的发育规模也有所增大，表现出碳酸盐岩台地连续性进一步变好的特点，且碳酸盐岩台地内颗粒滩微相的面积也较 SQ2 湖侵体系域时有所增大，其内部还发育少量生物礁微相。此外，半深湖—深湖亚相的发育规模则随着而减小(图 9-c)。

#### 4.2.4 SQ3 湖侵体系域与 SQ3 湖退体系域

SQ3 湖侵体系域基本继承了 SQ2 湖退体系域时期的沉积体系特征，主要发育三角洲相、滨湖亚相、浅湖亚相、碳酸盐岩台地相、生物礁微相、颗粒滩微相及半深湖—深湖亚相。其中，滨浅湖亚相和碳酸盐岩台地相带的发育规模有所增大，表现出碳酸盐岩台地连续性进一步变好的特点，且碳酸盐岩台地内颗粒滩微相及生物礁微相的面积比 SQ2 湖退体系域时略大。此外，半深湖—深湖亚相的发育规模则随着而减小(图 9-d)。

湖退体系域时期的沉积展布特征与 SQ3 湖侵体系域的差异较小，但 SQ3 湖退体系域时期滨浅湖微相及三角洲相发育的面积更大，碳酸盐岩台地分布范围也有所增大，颗粒滩微相分布面积较 SQ3 湖侵体系域大，生物礁微相更为发育(图 9-e)。

大坎波斯盆地 SQ3 沉积时，盆地发育进入拗陷期，主要表现为 SQ3 时期较 SQ1 和 SQ2 发育更多的碳酸盐岩沉积，显示构造活动弱及沉积水体持续变浅的特征。

整体而言，自 SQ1 湖退体系域时期至 SQ3 湖退体系域沉积时期，大坎波斯盆地经历了裂陷期—转换期—拗陷期构造活动转变，在区内主要表现出构造活动变弱及沉积水体持续变浅的特征，致使盆地内 SQ3 时期较 SQ1 和 SQ2 发育更多的碳酸盐沉积，为油气优质储集空间发育奠定了物质基础。

## 5 沉积模式

早白垩世各期的沉积特征表明，大坎波斯盆地盐下段的同沉积构造主要经历了裂陷期、转换期和拗陷期。作为盆地盐下段地层发育演化的历史记录，盆地自下而上发育 SQ1、SQ2 和 SQ3 这 3 个层序。SQ1 形成时期，南大西洋强烈裂开，自南大西洋南部向北侵入（Karner and Driscoll，1999；Stanton *et al.*，2014），桑托斯断裂作用强烈，桑托斯盆地南部的 Florianopolis 高地和 Rio Grand 高地及 Walvis 海岭的阻隔使桑托斯盆地及以北地区与南部海水隔绝，形成了一个巨大的封闭湖盆。期间主要发育了三角洲、湖泊和少量的碳酸盐岩台地等沉积相，为典型的陆相沉积体系。SQ2 形成时期，南大西洋完全裂开，非洲板块和南美洲板块完全分离并开始漂移。此时大坎波斯盆地构造经历了由裂陷向拗陷转换的转换期，水体逐渐变浅总体上三角洲规模逐渐变大，碳酸盐岩台地规模逐渐增大。SQ3 形成时期，非洲板块向北漂移，南美洲板块向西南漂移，从此大坎波斯盆地开始持续拗陷，此时以碳酸盐岩台地和湖泊等沉积为主，水体持续变浅，碳酸盐岩台地内发育生物礁微相及浅滩微相。

大坎波斯盆地在裂陷期断裂活动强烈，同沉积深断裂发育，沉积基底地形高差大，隆坳格局明显，内部发育箕状与地堑—地垒型构造样式。盆地深水区多发育半深湖—深湖亚相灰黑色—黑色泥岩、泥灰岩等富有机质烃源岩，整体规模巨大。盆地西侧靠近古陆地区多发育碎屑岩；盆地内部箕状断裂上盘上倾方向及地垒区的浅水区，多发育碎屑岩及碳酸盐岩等具有较好物性特征的储集岩。在盆

地西部，靠近物源区地区多发育冲积扇、扇三角洲等近物源的砂砾岩沉积及三角洲相—滨湖亚相砂岩、粉砂岩等沉积。

在裂陷期早期的盆地内部，初始阶段（CAM 沉积期）覆水较浅，洼陷地区多沉积砂岩等碎屑岩沉积，同时由于区内基岩中火山岩发育，火山岩中镁铝硅酸盐矿物很发育，风化溶蚀产物中大量的 $Mg^{2+}$、$Al^{3+}$、$SiO_4^{2-}$ 等离子进入湖水中，形成富镁黏土矿物，后续随着气候条件及沉积介质等变化，在水体相对较宁静地区沉淀出硅镁石及高镁黏土等矿物（Chafetz *et al.*，2018；Claes *et al.*，2021；Ge *et al.*，2021；Mercedes-Martín *et al.*，2022）。之后（PIC 沉积期）水体变深，区内洼陷区沉积大规模暗色泥岩，为区内重要的烃源岩沉积。裂陷期的晚期（ITP 沉积期），区内水体逐渐变浅，在远离物源区箕状断裂上盘上倾方向及地垒区等构造高部位，水体较浅、光照充足、水温适宜适合碳酸盐岩发育，多发育一定规模的碳酸盐岩台地相。在碳酸盐岩台地内部浅水高能区多发育以生物碎屑（介壳）石灰岩、内碎屑颗粒石灰岩、砾屑石灰岩等为主要组成的浅滩微相沉积。靠近台地之间的洼陷地区，随着水体变深，逐渐演化为中低能滩后低能带沉积。受较大的地形高差的影响，深水区发育一定规模的滑塌重力流沉积(图 10)。

裂陷期之后，大坎波斯盆地逐渐转为转换期（BVE300 沉积期）至拗陷期（BVE200－100 沉积期），构造活动逐渐减弱，同沉积断裂规模与强度变小，区内沉积基底地貌起伏逐渐变缓；浅水区面积逐渐扩大，深水区面积缩小；为储集层发育的重要时期。在盆地西部，靠近物源区地区多发育扇三角洲等近物源的砂砾岩沉积及滨湖相—三角洲相砂岩、粉砂岩等碎屑岩沉积。

在本阶段的盆地内部，洼陷区覆水深，多发育泥岩等沉积，为区内烃源岩发育区。盆地内部箕状断裂上盘上倾方向及地垒区等构造高部位，水体较浅、光照充足、水温适宜，适合碳酸盐沉积大规模发育。在转换期（BVE300 沉积期），碳酸盐岩台地内以发育层纹石灰岩为主，构造高部位高能区多发育球状微生物石灰岩、内碎屑颗粒石灰岩等。拗陷期（BVE200－100 沉积期），区内水深进一步变浅，碳酸盐岩台地规模增大；在碳酸盐岩台地内部浅水高能区多发育以灌木状叠层石石灰岩为主要组成的生物礁微相以及以内碎屑颗粒石灰岩、砾屑石灰岩、球状微生物石灰岩等为主的浅滩微相；浅滩靠海一侧，覆水变深、能量相对变弱，多发育以微齿状层纹石灰岩、平滑状层纹石灰岩等为主的沉积。期间地形起伏高差变小，深水区零星发育少量滑塌重力流沉积(图 10)。

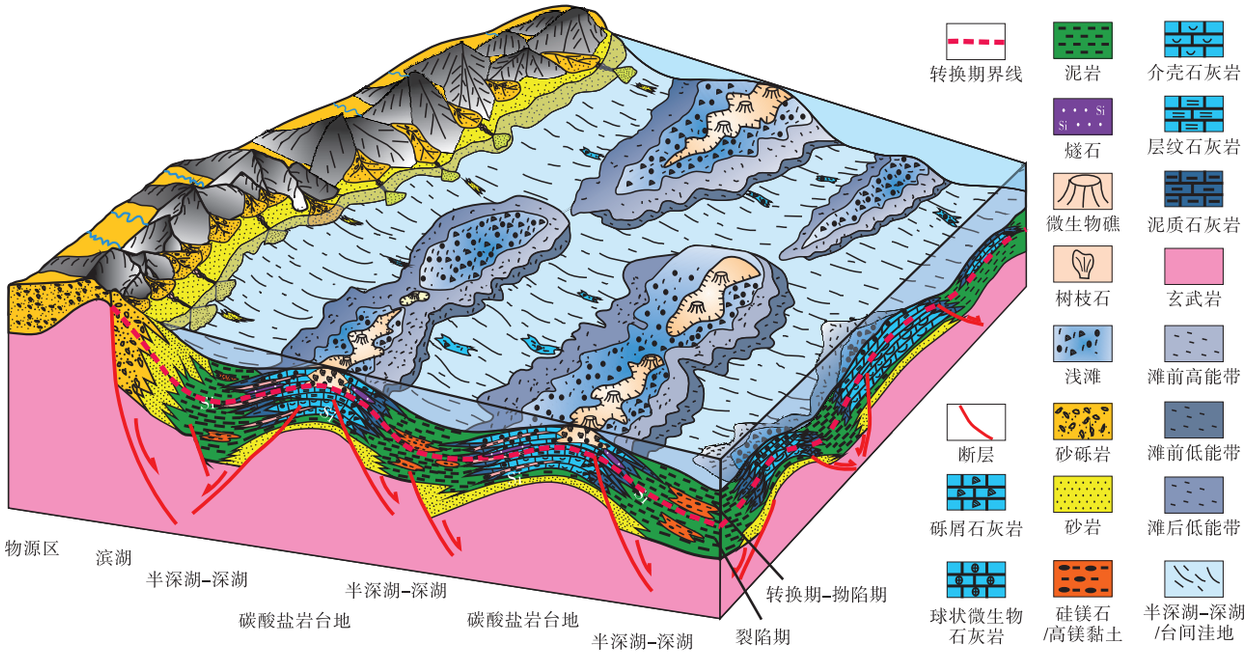



图 10　大坎波斯盆地早白垩世巴雷姆期—阿普特期沉积模式

Fig. 10　Depositional model of the Early Cretaceous Barremian-Aptian in Great Campos Basin

## 6 结论

1）建立了巴西东部大坎波斯盆地早白垩世盐下段层序地层格架，依据层序界面类型，识别出 4 个层序界面并将其划分为 3 个三级层序。

2）巴西东部大坎波斯盆地早白垩世盐下段沉积可划分为滨湖、浅湖、半深湖—深湖 3 种沉积亚相，并可将其细分为灰泥坪、滩后低能带、浅滩、生物礁、滩前高能带、滩前低能带、台间洼地、半深湖—深湖泥 8 类主要沉积微相。

3）SQ1 层序发育时期，大坎波斯盆地处于裂陷期，整体水体较深，在构造高部位浅水区发育多个孤立碳酸盐岩台地；SQ2 层序发育时期，水深变浅，部分孤立碳酸盐岩台地逐渐连片且规模逐渐扩大；SQ3 层序发育时期，水体持续变浅，孤立碳酸盐岩台地进一步连片，生物礁微相沉积大规模发育。盐层之下，油气生储组合发育良好。

### 参考文献(References)


鲍志东,王光付,冯志强,郑秀娟,李新坡,孙宇. 2024. 油气富集域早古生代以来的古地理演化及其对成藏的控制：南美—北非—中东—中亚特提斯域古地理与油气资源. 古地理学报,26(1)：1-4.［Bao Z D, Wang G F, Feng Z Q, Zheng X J, Li X P, Sun Y. 2024. Early Paleozoic palaeogeography evolution and its control on hydrocarbon accumulation: palaeogeography and petroleum resources of the South American-North African-Middle Eastern-Central Asian Tethys domain. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(1): 1-4］

何娟,何登发,李顺利,张光亚. 2011. 南大西洋被动大陆边缘盆地大油气田形成条件与分布规律：以巴西桑托斯盆地为例. 中国石油勘探,16(3)：57-67,8.［He J, He D F, Li S l, Zhang G Y. 2011. Forming conditions and distribution of large oil and gas fields in the South Atlantic passive continental margin basin: taking the Santos Basin in Brazil as an example. China Petroleum Exploration, 16(3): 57-67,8］

康洪全,程涛,李明刚,王健,陈凯. 2016. 巴西桑托斯盆地油气成藏特征及主控因素分析. 中国海上油气,28(4)：1-8.［Kang H Q, Cheng T, Li M G, Wang J, Chen K. 2016. Analysis of hydrocarbon accumulation characteristics and main controlling factors in Santos Basin, Brazil. China Offshore Oil and Gas, 28(4): 1-8］

康洪全,孟金落,程涛,贾怀存,白博,李明刚. 2018. 巴西坎波斯盆地深水沉积体系特征. 石油勘探与开发,45(1)：93-104.［Kang H Q, Meng J L, Cheng T, Jia H C, Bai B, Li M G. 2018. Characteristics of deep-water sedimentary system in Campos Basin, Brazil. Petroleum Exploration and Development, 45(1): 93-104］

李发有,班舒悦,王光付,孙建芳,丁峰,孙钰,王腾宇,徐海,陈诗望,夏昌盛,郑乃熙,鲍志东. 2024. 南美奥连特盆地白垩系 Napo 组 Main-M1 亚段沉积体系重建及油气勘探意义. 古地理学报,26(1)：17-27.［Li F Y, Ban S Y, Wang G F, Sun J F, Ding F, Sun Y, Wang T Y, Xu H, Chen S W, Xia C S, Zheng N X, Bao Z D. 2024. Sedimentary system reconstruction and implications for hydrocarbon exploration of the Cretaceous Napo Formation Main-M1 submember in Oriente Basin, South America. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(1): 17-27］

刘深艳,胡孝林,李进波. 2011. 巴西桑托斯盆地盐下大发现及其勘探意义. 中国石油勘探,16(4)：74-81.［Liu S Y, Hu X L, Li J B. 2011. Great discovery of pre-salt deposits in the Santos Basin, Brazil and its exploration significance. China Petroleum Exploration, 16(4): 74-81］

马中振,谢寅符,耿长波,张凡芹. 2011. 巴西坎波斯盆地石油地质特征与勘探有利区分析. 吉林大学学报(地球科学版),41(5)：1389-1396.［Ma Z Z, Xie Y F, Geng C B, Zhang F Q. 2011. Analysis of petroleum geological characteristics and favorable exploration areas in Campos Basin, Brazil. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 41(5): 1389-1396］

施昭彤. 2018. 大坎波斯盆地沉积类型及其分布模式. 中国石油大学(北京)硕士学位论文.［Shi Z T. 2018. Sedimentary types and distribution patterns of the Greater Campos Basin. Masteral dissertation of China University of Petroleum (Beijing)］

史卜庆,范国章,邵大力,王红平,赵俊峰,刘亚明,左国平,王朝锋,杨柳,马宏霞,丁梁波. 2021. 巴西桑托斯盆地盐下构造单元划分原则与方案刍议. 海相油气地质,26(3)：263-271.［Shi B Q, Fan G Z, Shao D L, Wang H P, Zhao J F, Liu Y M, Zuo G P, Wang C F, Yang L, Ma H X, Ding L B. 2021. Principles and schemes for the division of pre-salt tectonic units in the Santos Basin, Brazil. Marine Petroleum Geology, 26(3): 263-271］

王锦洲. 2020. 巴西坎波斯盆地构造特征与油气成藏关系研究. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.［Wang J Z. 2020. Study on the relationship between structural characteristics and hydrocarbon accumulation in Campos Basin, Brazil. Masteral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)］

邬长武. 2015. 南大西洋含盐盆地油气富集规律及勘探潜力. 新疆石油地质,36(1)：121-126.［Wu C W. 2015. Hydrocarbon accumulation and exploration potential in the saline basins of the South Atlantic. Xinjiang Petroleum Geology, 36(1): 121-126］

张德民,段太忠,张忠民,郝雁,姚威. 2018. 湖相微生物碳酸盐岩沉积相模式研究：以桑托斯盆地 A 油田为例. 西北大学学报(自然科学版),48(3)：413-422.［Zhang D M, Duan T Z, Zhang Z M, Hao Y, Yao W. 2018. Study on sedimentary facies model of lacustrine microbial carbonate rocks: a case study of Oilfield A in Santos Basin. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 48(3): 413-422］

张忠民,朱奕璇,张德民,苏玉山,姚威,鲍志东,宋健,沈卫宏. 2020. 巴西大坎波斯盆地盐下碳酸盐岩油气成藏规律与勘探启示. 中国石油勘探,25(4)：75-85.［Zhang Z M, Zhu Y X, Zhang D M, Su Y S, Yao W, Bao Z D, Song J, Shen W H. 2020. Oil and gas ac-

cumulation rules and exploration implications of pre-salt carbonate rocks in the Great Campos Basin, Brazil. China Petroleum Exploration, 25(4): 75-85]

朱石磊, 吴克强, 吕明, 王颖, 董朔朋, 蔡露露, 廖计华, 邹梦君, 孙涛, 李楠, 王龙颖. 2017. 巴西坎波斯盆地湖相介壳灰岩特征及沉积模式. 中国海上油气, 29(2): 36-45. [Zhu S L, Wu K Q, Lü M, Wang Y, Dong S P, Cai L L, Liao J H, Zou M J, Sun T, Li N, Wang L Y. 2017. Characteristics and depositional models of lacustrine shell limestone in the Campos Basin, Brazil. China Offshore Oil and Gas, 29(2): 36-45]

Beglinger S E, Van Wees J D, Cloetingh S, Doust H. 2012. Tectonic subsidence history and source-rock maturation in the Campos Basin, Brazil. Petroleum Geoscience, 18: 153-172.

Blaich O A, Faleide JI, Tsikalas F. 2011. Crustal breakup and continent-ocean transition at South Atlantic conjugate margins. Journal of Geophysical Research, 116(B1): 1-38.

Chafetz H, Barth J, Cook M, Guo X, Zhou J. 2018. Origins of carbonate spherulites: implications for Brazilian Aptian pre-salt reservoir. Sedimentary Geology, 365: 21-33.

Christopher J M, Eugene R B. 2004. Postrift sequence stratigraphy, paleogeography, and fill history of the deep-water Santos Basin, offshore southeast Brazil. AAPG Bulletin, 88(7): 923-945.

Claes H, Miranda T, Thiago C, Falcão T C, Soete J, Mohammadi Z, Zieger L, Erthal M M, Aguillar J, Schmatz J, Busch A, Swennen R. 2021. Model for calcite spherulite formation in organic, clay-rich, lacustrine carbonate shales (Barbalha Formation, Aptian, Araripe Basin, NE Brazil). Marine and Petroleum Geology, 128: 104988.

Ge Y Z, Della P G, Pederson C L, Lokier S W, Hoffmann R, Immenhauser A. 2021. Botryoidal and spherulitic aragonite in carbonates associated with microbial mats: precipitation or diagenetic replacement product? Frontiers in Earth Science, 9: 698952.

Karner G D, Driscoll N W. 1999. Tectonic and stratigraphic development of the West African and eastern Brazilian margins: in-sights from quantitative basin modelling. Geological Society London Special Publications, 153(1): 11-40.

Mercedes-Martín R, Ashit R, Mike R, Mónica S R. 2022. Effects of salinity, organic acids and alkalinity on the growth of calcite spherulites: implications for evaporitic lacustrine sedimentation. The Depositional Record, 8(1): 143-164.

Moreira J L P, Madeira C V, Gil J A, Machado M. 2007. Bacia de Santos. Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2): 531-549.

Moulin M, Aslanian D, Unternehr P. 2010. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean. Earth-Science Reviews, 98(1/2): 1-37.

Muniz M C, Bosence D W J. 2018. Lacustrine carbonate platforms: facies, cycles, and tectonosedimentary models for the presalt lagoa feia group (Lower Cretaceous), Campos Basin, Brazil. AAPG Bulletin, 102(12): 2569-2597.

Neumann V H, Borrego A G, Cabrera L, Dino R. 2003. Organic matter composition and distribution through the Aptian-Albian lacustrine sequences of the Araripe Basin, northeastern Brazil. International Journal of Coal Geology, 54(1-2): 21-40.

Stanton N, Ponte-Neto C, Bijani R, Masini E, Fontes S, Flexor J M. 2014. A geophysical view of the southeastern Brazilian margin at Santos Basin: insights into rifting evolution. Journal of South American Earth Sciences, 55: 141-154.

Thompson D L, Stilwell J D, Hall M. 2015. Lacustrine carbonate reservoirs from Early Cretaceous rift lakes of western Gondwana: pre-salt coquinas of Brazil and west Africa. Gondwana Research, 28(1): 26-51.

(责任编辑　王绍华; 英文审校　龚承林)