

# 巴西桑托斯盆地下白垩统 Barra Velha 组 原位碳酸盐岩组构及成因: 研究进展与方向\*

高秋灵<sup>1,2</sup> 李 忠<sup>2,3</sup> 王红平<sup>4</sup> 杨 柳<sup>4</sup> 卞 凯<sup>5</sup> 许承武<sup>6</sup>

1 河南工程学院环境与生物工程学院, 河南郑州 451191

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

4 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023

5 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

6 东北石油大学非常规油气研究院, 黑龙江大庆 163318

**摘 要** 下白垩统 Barra Velha (BVE) 组湖相碳酸盐岩是巴西东部桑托斯盆地深水盐下重要油气储集层, 因具有特殊的岩石组构而成为学术界关注的热点。近年来的研究认为, BVE 组原位 (In-situ) 碳酸盐岩主要由方解石树晶、方解石球晶和镁质黏土组成, 沉积组构存在微生物成因和化学成因等对立观点, 导致在岩石分类时出现完全不同的命名方案, 沉积模式也有微生物沉积、化学沉积、热泉钙华沉积等不同认识。因尚未发现明显的生物结构/物质, 且树晶和球晶均发育纤维状晶体结构, 故越来越多的研究成果支持以化学成因为主的观点, 但形成过程中是否存在微生物和/或热液的参与仍难以判定。古生物化石、自生黏土矿物和 C-O-Sr 同位素等指标显示, BVE 组碳酸盐岩形成于高盐、高碱、高蒸发的湖泊环境中, 然而水体的温度和深度、Mg-Si-Ca 等物质的来源及碳酸盐形成阶段或沉积—成岩叠加阶段的作用过程和效应等依然不太清楚。在对 BVE 组湖相碳酸盐岩相关研究进展进行评述的基础上, 笔者建议未来应从环境介质参数、物质来源、主要组分的成因等方面切入, 开展高精度显微组构与原位主微量元素及同位素分析, 同时配套相关实验和数值模拟, 并结合现代沉积考察认识、岩石宏观分布特征及盆地古构造、古气候演化等动力学系统信息, 从多个角度共同揭开这套碳酸盐岩的成因谜题。

**关键词** 原位碳酸盐岩 方解石树晶 方解石球晶 镁质黏土 Barra Velha 组 桑托斯盆地

**第一作者简介** 高秋灵, 女, 1986 年生, 副教授, 主要从事储层沉积学和岩石地球化学研究。E-mail: g3q7l91@163.com。

**通讯作者简介** 李忠, 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事沉积学与盆地动力学研究。E-mail: lizhong@mail.iggcas.ac.cn。

中图分类号: P588.24<sup>+</sup>5 文献标志码: A

## In-situ carbonate fabric and genesis of the Lower Cretaceous Barra Velha Formation, Santos Basin, Brazil: research progress and future directions

GAO Qiuling<sup>1,2</sup> LI Zhong<sup>2,3</sup> WANG Hongping<sup>4</sup> YANG Liu<sup>4</sup> BIAN Kai<sup>5</sup> XU Chengwu<sup>6</sup>

1 College of Environment and Biological Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China

\* 国家自然科学基金项目(编号: 42102168)资助。[Financially supported by the National Natural Sciences Foundation of China (No. 42102168)]

收稿日期: 2025-01-26 改回日期: 2025-04-03

2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 School of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, China

5 School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

6 Institute of Unconventional Oil and Gas, Northeast Petroleum University, Heilongjiang Daqing 163318, China

**Abstract** The lacustrine carbonates of the Lower Cretaceous Barra Velha (BVE) Formation are important pre-salt oil and gas reservoirs in the deep-water Santos Basin in eastern Brazil, and their unique rock fabric characteristics have become the focus of academic attention. Over the past decade, numerous studies have been published on the fabric and genesis of these carbonates, yet controversies persist. Existing researches indicate that the in-situ carbonates of the BVE Formation mainly consist of calcite shrubs, calcite spherulites, and magnesium-rich clay minerals. There are opposing views on the genesis of the sedimentary fabric, whether it is microbial or chemical in origin, and correspondingly different classification schemes for the rocks. The deposition models also vary, including microbial deposition, chemical deposition, and travertine deposition. Since no obvious biological structures/substances have been identified so far, and the shrubs and spherulites exhibit fibrous crystal structures, an increasing number of studies support the view that chemical precipitation is the dominant process. However, it remains difficult to determine whether microbial and/or hydrothermal activity was involved. The comprehensive investigation of paleontological, autogenetic clay minerals and C-O-Sr isotopes shows that the sedimentary environment of BVE carbonates is a lake with high salt, high alkali and high evaporation, but the water temperature, water depth, material sources such as Mg-Si-Ca, carbonate formation stage or sedimentary and diagenetic superposition process and effect are still unclear. Based on the review of the relevant research progress, it is suggested that future studies should start from environmental medium parameters, material sources, and the origin of the main components, and carry out matched high-precision micro-fabric and in-situ major and trace elements, isotope analyses, as well as supporting experiments and numerical simulation, combined with modern investigation, macroscopic rock distribution, and dynamic system information on basin paleostructure and paleoclimate evolution, to unravel the enigma of the genesis of these carbonates together.

**Key words** in-situ carbonates, calcite shrub, calcite spherulite, Mg-clay, Barra Velha Formation, Santos Basin

**About the first author** GAO Qiuling, born in 1986, associate professor, is engaged in researches on reservoir sedimentology and petrogeochemistry. E-mail: g3q7l91@163.com.

**About the corresponding author** LI Zhong, born in 1964, researcher, Ph.D. supervisor, is engaged in researches on sedimentology and sedimentary basin dynamics. E-mail: lizhong@mail.iggcas.ac.cn.

21 世纪以来, 在海洋深水盐下地层取得了一系列重大油气发现, 特别是巴西东部桑托斯盆地已成为南大西洋两岸可采储量最大的盆地 (Anjos *et al.*, 2024; 冯志强等, 2024)。作为桑托斯盆地油气主要储集层的 Itapema (ITP) 组和 Barra Velha (BVE) 组湖相碳酸盐岩, 尤其是组构特殊的 BVE 组碳酸盐岩, 也因之备受学术界关注。

桑托斯盆地 BVE 组碳酸盐岩主要发育原位 (in-situ) 碳酸盐岩和改造 (reworked) 碳酸盐岩两大类岩相 (Terra *et al.*, 2010; Gomes *et al.*, 2020; Wright and Barnett, 2020; De Ros and Oliveira, 2023; Anjos *et al.*, 2024)。原位碳酸盐岩以圆球状、灌木丛状方解石颗粒骨架和镁质黏土基质为特征 (Wright and Barnett, 2015; Gomes *et al.*, 2020,

2025; Carvalho *et al.*, 2022; De Ros and Oliveira, 2023; Schrank *et al.*, 2024), 与常见的海相和湖相碳酸盐岩 (Wright and Barnett, 2015; 杨柳等, 2023) 明显不同, 因此笔者采用“原位 (in-situ)”的译名, 以区别以往习惯称谓的“原地 (相对于异地)”沉积。

针对 BVE 组碳酸盐岩的分类命名和成因, 国内外已经开展了大量研究, 虽取得了许多成果, 但成因问题尚未得到有效解决, 仍存在微生物成因和化学成因的争议 (Muniz and Bosence, 2015; Wright and Barnett, 2015, 2020; Saller *et al.*, 2016; Wright, 2022; Rossoni *et al.*, 2024)。这一争议导致对该套岩石具有完全不同的分类命名方案 (Terra *et al.*, 2010; De Ros and Oliveira, 2023), 严重制约了对 BVE 组储集层的描述和预测。

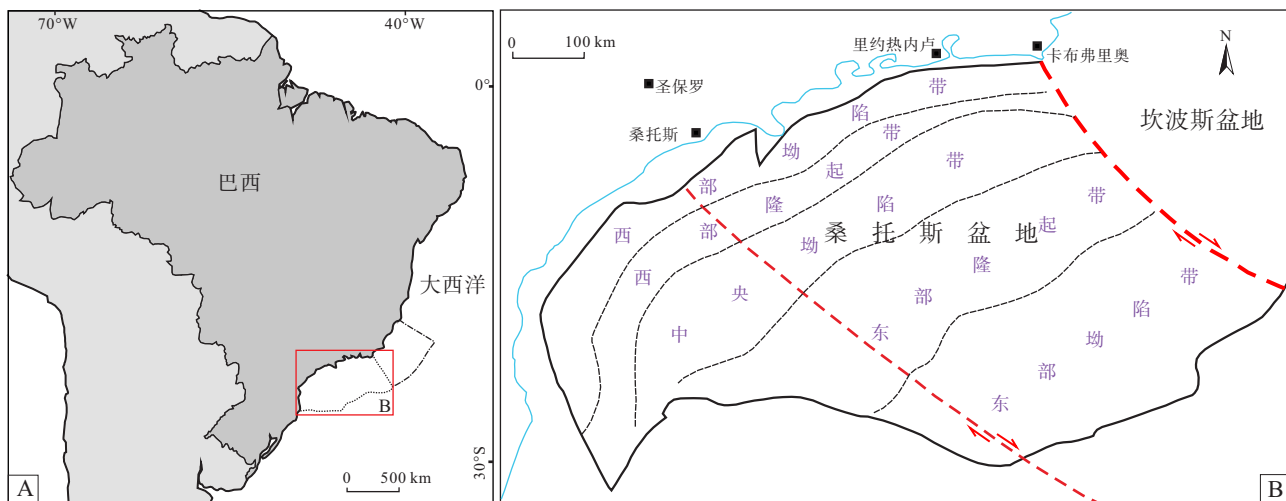
笔者旨在全面梳理、分析和总结桑托斯盆地 BVE 组原位碳酸盐岩在岩石组构、分类命名和岩石成因方面取得的主要认识和进展, 凝练科学问题, 提出进一步研究的重点方向, 为深入揭示这套碳酸盐岩的成因机制提供参考。

## 1 区域地质背景

桑托斯盆地位于南大西洋西侧的巴西东部海域, 北与坎波斯盆地相邻, 南接佩洛塔斯盆地, 面积约  $32.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 水深  $0 \sim 3200 \text{ m}$  (Meisling *et al.*, 2001)。该盆地整体呈北东—南西走向, 具

隆拗相间的构造格局 (图 1)。桑托斯盆地属于典型的大西洋型被动大陆边缘盆地, 形成于冈瓦纳大陆解体和自南向北的南大西洋张开时期 (Chang *et al.*, 1992; 郭建宇等, 2009), 自早白垩世至今, 先后经历了裂谷期、过渡期和漂移期等构造演化过程 (图 2), 可分为断陷、拗陷和被动大陆边缘 3 个构造阶段 (Chang *et al.*, 1992; 杨柳等, 2023)。

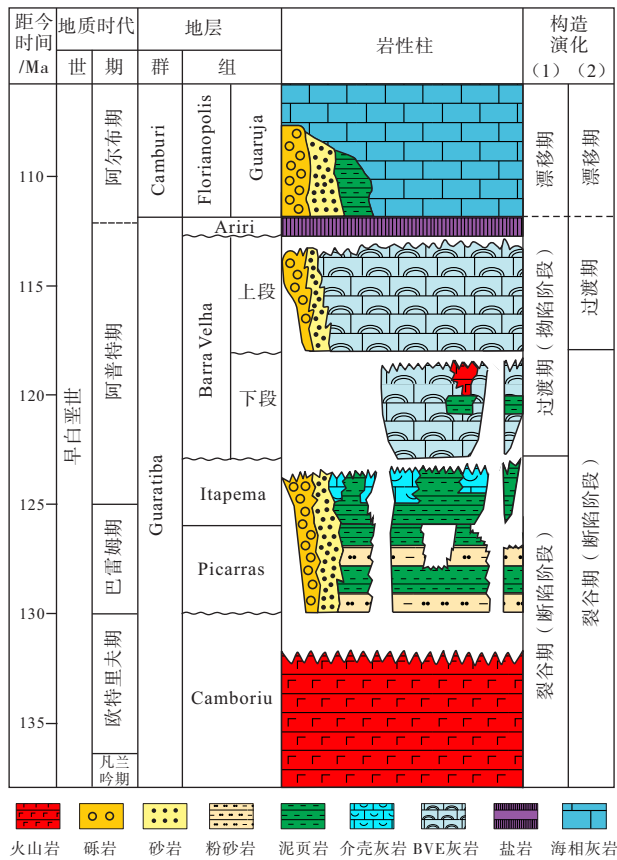
在断陷阶段 (早白垩世欧特里夫期—阿普特期早期), 桑托斯盆地构造活动强烈, 断裂广泛发育, 出现多个 NE 向的大型隆起和拗陷带, 呈隆拗相间的断陷结构 (康洪全等, 2016), 南部边界为里奥格兰德转换断裂带。欧特里夫期, 在大规模火山活动的影响下 (Moulin *et al.*, 2010), 盆地内发育一套 Camboriu 组玄武岩。巴雷姆期早—中期, 主要发育 Picarras 组河流、三角洲及湖相沉积, 其中深湖—半深湖水体深度大, 发育厚层泥页岩。巴雷姆期晚期至阿普特期早期为 ITP 组沉积时期, 受相对封闭的裂陷环境及近赤道地区强烈蒸发作用的影响, 湖水深度有所变浅, 其中滨湖区仍发育河流及三角洲沉积, 位于湖盆古隆起之上的浅湖区发育一套介壳灰岩, 半深湖—深湖区以泥质灰岩和泥岩沉积为主 (汪新伟等, 2013; 康洪全等, 2016; 窦立荣等, 2024)。ITP 组沉积末期, 在南美洲和非洲板块之间发育窄洋壳, 并发生热隆升, 出现一次大的沉积间断。伴随着窄洋壳的形成, 出现强烈的岩浆活动, 在盆地南部边界的里奥格兰德转换断裂带形成近东西向的 Rio Grande 隆起—Walvis 火山岩



A—区域位置图 (据 Pietzsch *et al.*, 2020); B—内部构造分区图 (据何赛等, 2022)

图 1 桑托斯盆地区域位置与内部构造分区

Fig. 1 Location and regional tectonic zoning of Santos Basin



注：(1) 据 Moreira 等, 2007; (2) 据 Buckley 等, 2015; 波浪线代表不整合

图 2 桑托斯盆地下白垩统综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column of the Lower Cretaceous in Santos Basin

高地 (Chang *et al.*, 1992; 窦立荣等, 2024)。

至阿普特期中期, 裂谷作用减弱, 桑托斯盆地进入较稳定的拗陷阶段 (Chaboureau *et al.*, 2013)。受火山岩高地横向阻挡的控制, BVE 组沉积时期该盆地整体为海水循环受限的泻湖环境, 除盆地边缘发育碎屑岩沉积外, 主要形成一套分布广泛的湖相碳酸盐沉积 (Chang *et al.*, 1992; 窦立荣等, 2024), 其中古隆起上前期出现的较大个体介壳类生物已经随着盐度增高而灭绝, 取而代之的是完全不同的碳酸盐岩沉积建造。BVE 组内部发育 1 期不整合, 将 BVE 组分为下段和上段两部分。至阿普特期晚期, 随着水体盐度不断增加, 在碳酸盐岩沉积建造之上发育一套由薄层硬石膏和厚层盐岩组成的 Ariri 组蒸发岩层系 (汪新伟等, 2013; 何赛等, 2022; 窦立荣等, 2024)。

自阿尔布期开始, 随着洋中脊的形成和洋壳的

扩张, 桑托斯盆地进入被动大陆边缘演化阶段, 沉积了一套巨厚的海相地层。其中, 阿尔布期以浅海碳酸盐沉积为主; 晚白垩世赛诺曼期—土伦期随着全球性海平面上升, 主要发育一套海相泥页岩。漂移晚期发育巨厚的海相泥岩, 局部夹有浊积砂岩 (汪新伟等, 2013; 窦立荣等, 2024)。

受构造运动、火山活动、气候变化、南部海侵等内外动力地质作用的综合影响, 在断陷至拗陷阶段, 即巴雷姆期至阿普特期, 桑托斯盆地经历了淡水湖—咸水湖—盐湖的演化过程 (Pietzsch *et al.*, 2018), 其中 BVE 组形成于咸水湖阶段 (杨柳等, 2023)。

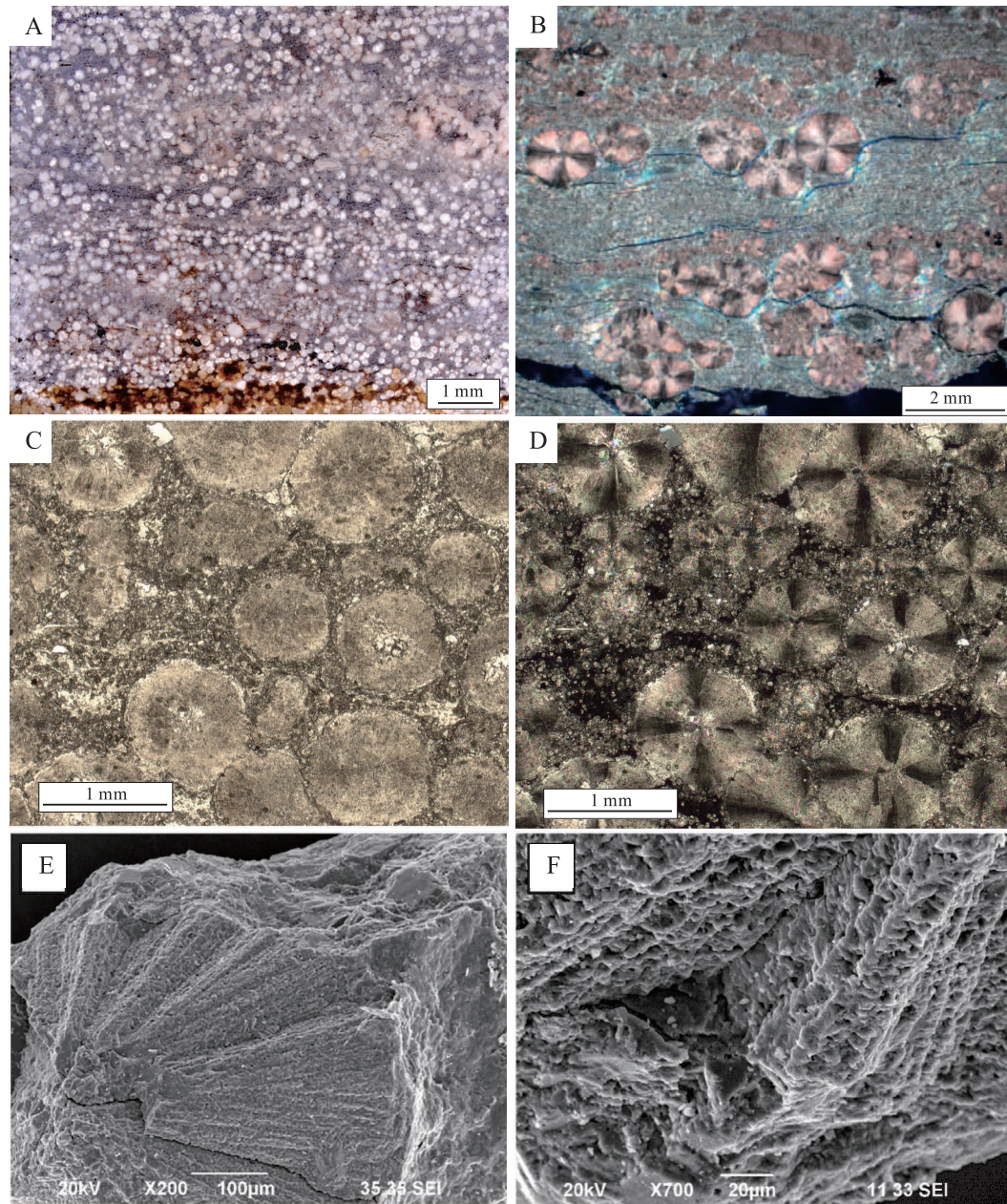
## 2 BVE 组原位碳酸盐岩组构特征与分类：研究现状

在 BVE 组碳酸盐岩中, 原位、改造、结晶等类型碳酸盐岩均有发育, 但主要以原位和改造碳酸盐岩为主 (Terra *et al.*, 2010; Anjos *et al.*, 2024)。BVE 组原位碳酸盐岩组构特殊, 不同于传统的海相和湖相碳酸盐岩 (Wright and Barnett, 2015; 杨柳等, 2023)。

### 2.1 组构特征

桑托斯盆地 BVE 组原位碳酸盐岩由骨架/颗粒、基质、胶结物和孔隙构成 (图 3; 图 4; 图 5)。

骨架/颗粒成分以方解石为主, 形态主要分为 2 类 (图 3; 图 4)。一类呈圆球状 (图 3), 最大直径接近 2 mm, 磨圆度较高, 正交偏光镜下具有典型的十字消光现象, 英文中称其为 “spherulite” (Terra *et al.*, 2010; Gomes *et al.*, 2020; Wright and Barnett, 2020; De Ros and Oliveira, 2023; Rebelo *et al.*, 2023), 国内将其翻译为 “球粒” (朱奕璇等, 2022; 黄继新等, 2023; 孙海涛等, 2023; 杨柳等, 2023)。然而, 在碳酸盐岩领域早已有 “球粒” 的概念, 主要是指机械成因的内碎屑或生物成因的粪球粒, 而 BVE 组圆球状颗粒的特征和成因 (见后文) 均与已有 “球粒” 不同, 故考虑到该圆球状颗粒主要由放射状的方解石晶体集合体组成 (Farias *et al.*, 2019), 笔者建议将其称为 “球晶”。另一类呈不同形态的树状 (图 4), 如灌木状 (arbusiform)、乔木状 (arborescent)、树枝状 (dendriiform)、纹层状—柱状分枝 (laminar to co-



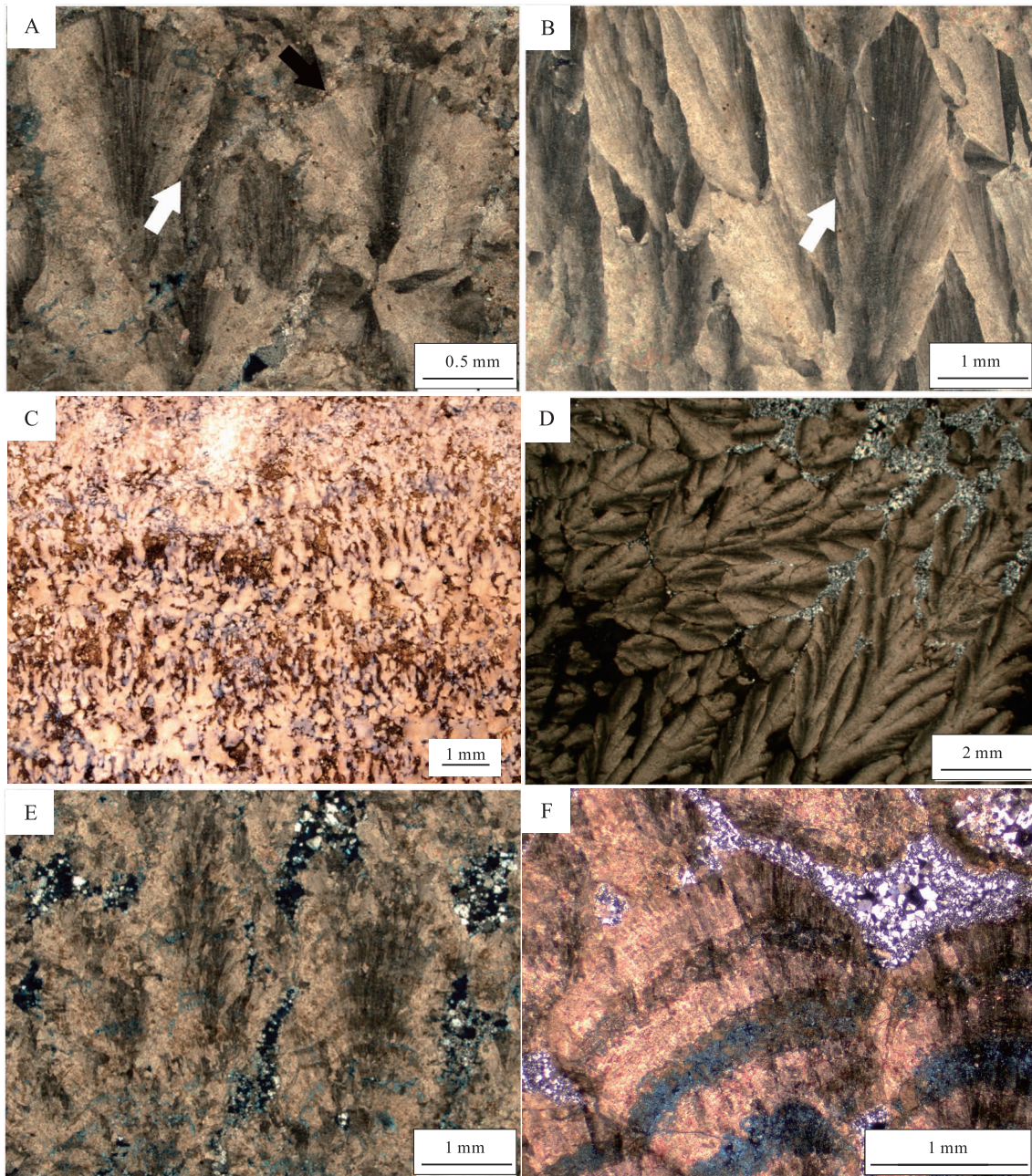
A—井壁取心 (Terra *et al.*, 2010); B—球晶漂浮于镁质黏土中, 切割镁质黏土层状结构, 铸体薄片, 染色, 正交光 (Carramal *et al.*, 2022); C, D—同一视域显微特征, C 为单偏光, D 为正交光 (Terra *et al.*, 2010); E, F—球晶形貌特征, SEM 图像 (Farias *et al.*, 2019)

图 3 桑托斯盆地 BVE 组原位球晶微观特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of in-situ spherulites of the BVE Formation in Santos Basin

lumnar branched) 等 (Terra *et al.*, 2010; Rodriguez-Berriguete *et al.*, 2022), 高度可达 20 mm (Wright and Barnett, 2015), 一般高度大于宽度 (Farias *et al.*, 2019), 正交偏光下发育波状消光现象。早期认为其是微生物成因, 因此称之为“叠层石” (stromatolite) (Terra *et al.*, 2010); 之后, 越来越多的学者认为这类组分属于化学成因 (Wright and Barnett, 2015; Farias *et al.*, 2019; Basso *et al.*,

2021; Rodriguez-Berriguete *et al.*, 2022; Fontaneta *et al.*, 2024), 并依其显微光学形态称之为“灌木 (shrub)”或“束状壳 (fascicular crust)” (Gomes *et al.*, 2020; Wright and Barnett, 2020; Carramal *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2022; De Ros and Oliveira, 2023)。国内学者多接受其为“微生物成因”观点 (张德民等, 2018; 罗晓彤等, 2020; 贾怀存等, 2021; 朱奕璇等, 2022; 黄继新等,



A—灌木状树晶，铸体薄片，正交光 (Rodríguez-Berriguete *et al.*, 2022)；B—乔木状树晶，正交光 (Rodríguez-Berriguete *et al.*, 2022)；C—树枝状树晶，井壁取心 (Terra *et al.*, 2010)；D—树枝状树晶，正交光 (Rodríguez-Berriguete *et al.*, 2022)；E—纹层状树晶，铸体薄片，正交光 (Rodríguez-Berriguete *et al.*, 2022)；F—纹层状树晶，铸体薄片，正交光 (Schrank *et al.*, 2024)

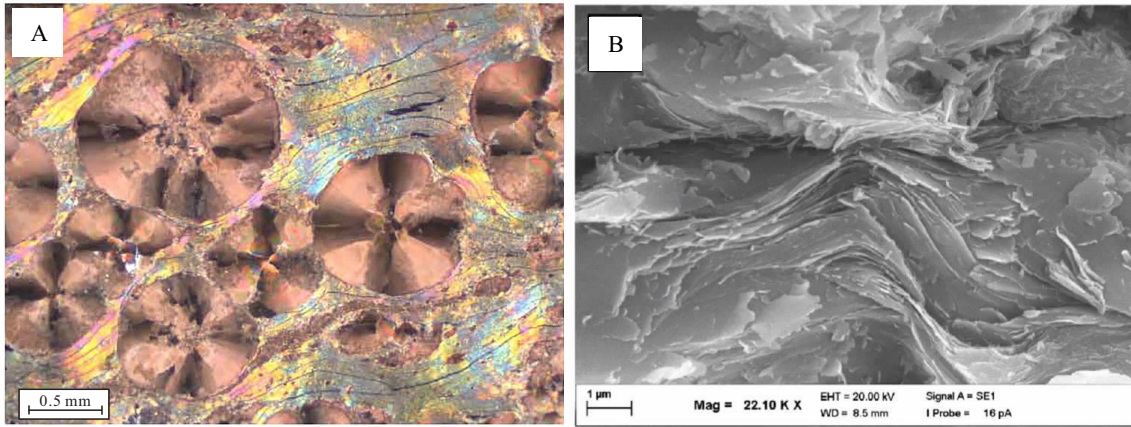
图 4 桑托斯盆地 BVE 组原位树晶微观特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of in-situ shrubs of the BVE Formation in Santos Basin

2023)，近年来部分学者也开始接受“化学成因”的观点，并称其为“灌木颗粒”（杨柳等，2023）或“丛晶/枝晶、扇晶”（孙海涛等，2023）。考虑到岩石命名的简洁性，笔者建议将其称为“树晶”。

基质主要由镁质黏土组成(图 5)，含少量陆源

泥质组分，是否还含有沉积成因的泥晶方解石目前尚存在争议 (Gomes *et al.*, 2020; De Ros and Oliveira, 2023; Schrank *et al.*, 2024)。镁质黏土为自生矿物，主要由硅镁石、皂石和蜡蛇纹石组成 (Netto *et al.*, 2022a, 2022b)，在桑托斯盆地发育广泛 (Carramal *et al.*, 2022)，是原位碳酸盐岩的



A—镁质黏土层状结构被球晶切割，染色，正交光 (De Ros and Oliveira, 2023); B—镁质黏土层状结构，SEM 图像 (Farias *et al.*, 2019)

图 5 桑托斯盆地 BVE 组原位镁质黏土微观特征

Fig. 5 Microcosmic characteristics of in-situ Mg-clays of the BVE Formation in Santos Basin

重要组分之一 (Tosca and Wright, 2014; Gomes *et al.*, 2020; Carvalho *et al.*, 2022; De Ros and Oliveira, 2023; Schrank *et al.*, 2024)。

原位碳酸盐岩遭受的成岩改造作用较为复杂，以胶结、溶解作用最为重要，先后经历了多期白云石化作用、硅化作用和溶解作用(康洪全等, 2018; Azerêdo *et al.*, 2021; Carvalho *et al.*, 2022; Schrank *et al.*, 2024; Gomes *et al.*, 2025)。白云石化作用形成微晶、菱形、薄片状、半自形—他形、鞍状等多种不同形态的白云石，硅化作用形成隐晶—微晶、粉—细晶、燧石、石英边等多种形态的石英 (Carvalho *et al.*, 2022; Schrank *et al.*, 2024; Gomes *et al.*, 2025)。此外，胶结物中也含有少量方解石、

片钠铝石等 (Carvalho *et al.*, 2022; Schrank *et al.*, 2024)。溶解作用形成多种类型的次生孔隙，其与原生孔隙叠加，构成 BVE 组优质储集层 (Azerêdo *et al.*, 2021)。

## 2.2 岩石分类

目前国际上公开发表的、有一定影响的 BVE 组原位碳酸盐岩分类命名方案共有 4 种(表 1)，分别为 Terra 等 (2010) 的微生物分类方案及 Wright 和 Barnett (2017, 2020)、Gomes 等 (2020)、De Ros 和 Oliveira (2023) 的无机分类方案。

在 Terra 等 (2010) 的分类方案中，作者认为不同形态的树晶均是叠层石，原位碳酸盐岩主体为

表 1 桑托斯盆地 BVE 组原位碳酸盐岩主要组分命名方案汇总

Table 1 Summary of nomenclature schemes for major components of in-situ carbonates of the BVE Formation in Santos Basin

分类命名依据 (岩石成因认识)	岩石主要组分			文献来源
	树晶	球晶	泥质	
微生物成因	叠层石	球晶岩	层纹岩	Terra <i>et al.</i> , 2010
	叠层石灰岩	鲕粒灰岩	—	康洪全等, 2018; 贾怀存等, 2021
	枝状石灰岩	球状微生物灰岩	层纹石灰岩	罗晓彤等, 2020
	叠层石灰岩	球粒微生物岩	层纹岩	朱奕璇等, 2022
	叠层石灰岩	球粒灰岩	层纹岩	黄继新等, 2023
化学成因	树晶骨架灰岩	球晶浮石岩	纹层状钙质泥岩	Wright and Barnett, 2017, 2020
	树晶灰岩	球晶灰岩	泥岩 球晶质泥岩	Gomes <i>et al.</i> , 2020
	球晶质树晶灰岩	树晶质球晶灰岩		
	含泥球晶质树晶灰岩	含泥树晶质球晶灰岩 泥质球晶灰岩		
	树晶灰岩	球晶灰岩	泥岩	De Ros and Oliveira, 2023
	树晶球晶灰岩、泥质树晶灰岩、泥质球晶灰岩			
灌木颗粒灰岩	球粒灰岩	泥晶灰岩	杨柳等, 2023	

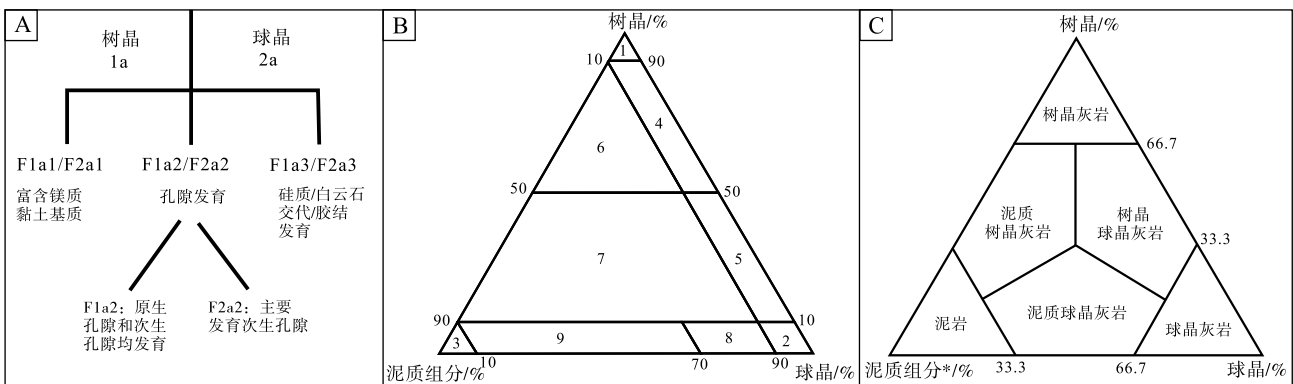
微生物岩，主要发育粘结灰岩 (boundstone)、形态各异的叠层石 (stromatolite)、凝块石 (thrombolite)、树枝石 (dendrolite)、均一石 (leiolite)、球晶岩 (spherulitite)、热泉钙华 (travertine) 等岩石类型。目前，巴西国家石油公司仍在使用这套分类方案 (Anjos *et al.*, 2024)。

随着对 BVE 组原位碳酸盐岩研究的深入，越来越多的学者认为树晶和球晶主要为化学成因 (Wright and Barnett, 2015; Herlinger *et al.*, 2017; Farias *et al.*, 2019; Lima and De Ros, 2019; Wright, 2022)。基于桑托斯盆地 10 个油田中的 19 口井共计 3502 张 BVE 组岩石薄片，Wright 和 Barnett (2017, 2020) 提出了该套原位碳酸盐岩的第 1 个无机分类命名方案(图 6-A)，认为其主要发育 3 种岩相，并根据组分类型和结构成因分别命名为：主要由树晶构成的树晶骨架灰岩 (shrub frame-stone, F1)、主要由球晶组成的球晶浮石岩 (spherulite floatstone, F2) 及主要由细粒组分组成的纹层状钙质泥岩 (laminated calcimudstone, F3)。对于 F1 和 F2 岩相，根据镁质黏土含量、孔隙及硅质/白云石交代/胶结作用，可进一步划分出不同的亚相。该分类方案的代号式命名 (如：F1a1、F2a3) 不容易被记忆，难以和特定岩石类型联系起来 (De Ros and Oliveira, 2023)，且分类方案没有明确各个岩相类型所对应的组构含量，从而限制了这一分类方案的推广和应用。

基于桑托斯盆地外高地 (东部隆起带的中部) 8 口井的 1921 个样品分析，Gomes 等 (2020) 提

出了另一种三组分定量分类命名方案(图 6-B)。在这种分类方案中，三组分分别为球晶、树晶和泥质，在其作为三端元而构成的三角图中，BVE 组原位碳酸盐岩共可划分出 9 种岩石类型，分别为：树晶灰岩 (shrubstone)、球晶灰岩 (spherulitestone)、泥岩 (mudstone)、树晶质球晶灰岩 (shrubby spherulitestone)、球晶质树晶灰岩 (spherulitic shrubstone)、含泥球晶质树晶灰岩 (spherulitic shrubstone with mud)、含泥树晶质球晶灰岩 (shrubby spherulitestone with mud)、泥质球晶灰岩 (muddy spherulitestone) 和球晶质泥岩 (spherulitic mudstone)。

De Ros 和 Oliveira (2023) 也赞同 Gomes 等 (2020) 的三端元分类，但认为该方案侧重于储集层岩石类型、缺少泥质树晶灰岩 (muddy shrubstone) 等岩类，并且泥岩没有包含镁质黏土被方解石、白云石和硅质交代而形成的细粒岩石。基于此，De Ros 和 Oliveira (2023) 提出了优化版的分类方案(图 6-C)，将 BVE 组原位碳酸盐岩划分成 6 种岩石类型，分别为：树晶灰岩 (shrubstone)、球晶灰岩 (spherulstone)、泥岩 (mudstone)、树晶球晶灰岩 (shrub-spherulstone)、泥质树晶灰岩 (muddy shrubstone) 和泥质球晶灰岩 (muddy spherulstone)。其中，泥质组分包括自生镁质黏土、陆源泥及交代形成的方解石、白云石和硅质微晶。对于泥质组分的粒径界限，De Ros 和 Oliveira (2023) 建议采用 Folk (1968) 提出的方案，将泥质组分的粒径上限定为 62 μm。在研究 BVE 组原



A 图引自 Wright and Barnett, 2017, 2020; B 图引自 Gomes *et al.*, 2020; C 图引自 De Ros and Oliveira, 2023。B 图中代号意义：  
1—树晶灰岩；2—球晶灰岩；3—泥岩；4—球晶质树晶灰岩；5—树晶质球晶灰岩；6—含泥球晶质树晶灰岩；7—含泥树晶质球晶灰岩；8—泥质球晶灰岩；9—球晶质泥岩

图 6 BVE 组原位碳酸盐岩分类方案

Fig. 6 Classification schemes of in-situ carbonates of the BVE Formation in Santos Basin

位碳酸盐岩成岩演化时, Rossoni 等 (2024) 引用了这一分类方案。

由于样品的缺乏, 国内学者对桑托斯盆地 BVE 组原位碳酸盐岩的岩石学分类研究较少, 主要是继承 Terra 等 (2010) 的观点, 认为 BVE 组原位碳酸盐岩是微生物岩, 但岩石分类命名方案也不尽相同 (表 1)。康洪全等 (2018)、贾怀存等 (2021) 将球晶解释为鲕粒, 认为 BVE 组发育不同形态的叠层石灰岩和鲕粒灰岩。罗晓彤等 (2020) 将球晶解释为枝状石, 认为 BVE 组发育叠层石灰岩、枝状石灰岩、球状微生物灰岩、层纹石灰岩和核形石灰岩等。朱奕璇等 (2022) 通过对 12 口井的 533 块井壁取心、102 m 钻井取心以及 917 块薄片等资料的研究和分析, 认为 BVE 组原位碳酸盐岩以微生物碳酸盐岩为主, 可细分为叠层石灰岩、球粒微生物岩和层纹岩 3 类, 黄继新等 (2023) 则将其分别命名为叠层石灰岩、球粒灰岩和层纹岩。

孙海涛等 (2023)、杨柳等 (2023) 接受了 BVE 组原位碳酸盐岩为化学成因的观点, 其中杨柳等 (2023) 将其划分为灌木颗粒灰岩、球粒灰岩和泥晶灰岩 3 类。然而, 这类分类方案虽有很大进步, 但仍没有考虑到镁质黏土组分及与之相关的岩石类型。

综上所述, BVE 组原位碳酸盐岩的分类命名存在微生物分类和无机分类 2 种方案的巨大争议。其中, 微生物分类以 Terra 等 (2010) 为代表, 目前在油气勘探开发中应用广泛, 而无机分类则以 De Ros 和 Oliveira (2023) 为代表, 且该方案一经提出就立即引起了学者的关注和应用。

### 3 BVE 组原位碳酸盐岩成因: 认识及争议

从上述分析可以看出, 目前对桑托斯盆地 BVE 组原位碳酸盐岩分类命名还存在巨大争议, 而争议的根本原因在于对这类碳酸盐岩的结构组分和岩石的成因认识尚存在分歧。BVE 组原位碳酸盐岩的主要组分是树晶、球晶和镁质黏土 (Wright and Barnett, 2015, 2020; Gomes *et al.*, 2020; De Ros and Oliveira, 2023; Rebelo *et al.*, 2023)。

总体来说, 目前对作为基质存在的镁质黏土的

关注相对较少, 对其成因的认识还需要更多的证据来支持。鉴于树晶和球晶为明显的骨架/颗粒, 以及树晶灰岩和球晶灰岩作为储集层的重要性, 学者对树晶和球晶成因的研究较多, 且多和岩石成因研究相结合, 并形成了多种观点和认识 (表 2)。

#### 3.1 镁质黏土的成因

镁质黏土作为背景沉积物质, 纹层结构被球晶和树晶切断, 因此应是形成时间最早的沉积物 (如, Wright and Barnett, 2015; Carramal *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2022; Schrank *et al.*, 2024; Gomes *et al.*, 2025)。镁质黏土主要由硅镁石、皂石和蜡蛇纹石组成 (Netto *et al.*, 2022a, 2022b), 其中硅镁石和蜡蛇纹石是盆地内的新生矿物, 形成并稳定于高碱度环境中 ( $\text{pH} > 9$ , Tosca and Masterson, 2014; 或  $\text{pH}$  值为  $10 \sim 10.5$ , Tutolo and Tosca, 2018), 是大西洋两岸被动大陆边缘盆地盐下沉积的特色矿物。镁质黏土因具有特殊的成分和结构致使其对沉积化学环境很是敏感, 其形成和稳定受流体  $\text{pH}$  值、盐度、 $\text{Mg}/\text{Si}$  值、碎屑输入等多种因素的控制, 最初可能以胶体形式沉淀 (Tosca and Masterson, 2014; Tosca and Wright, 2014)。Wright (2012) 探讨了 BVE 组镁质黏土的成因, 认为其形成于流经基性火山岩地体的河流和热泉补给的湖泊环境, 该类环境具有高碱、富  $\text{Si}$  和  $\text{Mg}$  的水体条件, 有利于镁质黏土的沉淀。Souza-Egipsy 等 (2005) 曾在美国加利福尼亚碱性 Mono 湖的冷泉微生物岩中发现这种镁质硅酸盐沉积物, 一些学者主张生物膜薄层中  $\text{Mg}-\text{Si}$  的富集为微生物过程影响或导致镁质黏土矿化提供了证据 (Bontognali *et al.*, 2010; Burne *et al.*, 2014; Pace *et al.*, 2016), 微生物结构为镁质黏土成核提供了有利的基质 (substrate)。Carramal 等 (2022) 则认为如果镁质黏土的形成受微生物影响或控制的话, 那么镁质黏土的分布就会被局限于特定的岩相类型中, 但在桑托斯盆地及南大西洋两岸的多个盆地中, 镁质黏土作为背景沉积却是广泛发育 (Sabato Ceraldi and Green, 2016; Lima and De Ros, 2019; Carramal *et al.*, 2022; Schrank *et al.*, 2024), 这与局限的特定相类型分布相矛盾。同时, 对镁质黏土的微观特征和结构成分分析显示, 镁质黏土具有均一的化学成分和高有序度, 不含有微生物结构, 因此 Netto 等 (2022a, 2022b) 认为在镁质黏土形成过程中

表 2 桑托斯盆地 BVE 组及相邻盆地同时代原位碳酸盐岩岩石成因依据和不足汇总

Table 2 Genesis and existing issues of in-situ carbonates of the BVE Formation in Santos Basin and coeval adjacent basins

岩石成因观点	依据	主要文献来源	存在问题
湖相微生物成因	(1) 薄片观察到具有微晶壁的丝状体	Muniz, 2013; Muniz and Bosence, 2015	样品量少, 丝状体的发育数量和分布不清
	(2) 图像测井中, 显示向上凸起的层状结构	Muniz, 2013; Muniz and Bosence, 2015	这种结构是不是只有叠层石可以形成? 其空间分布又有多少? 与微生物活动产物相似, 但是不是微生物作用, 还需更多证据; 即使是微生物作用, 微晶化和侵蚀湾发生在部分树晶的顶部, 只能说明部分树晶沉积晚期或沉积后受到微生物作用的影响, 不能证明所有树晶都是微生物成因
	(3) 在部分树晶顶部识别出微晶化和侵蚀湾, 可能与微生物活动有关	Saller <i>et al.</i> , 2016	
	(4) 树晶向上垂向生长和形成沉积高地的能力, 与现代的珊瑚和珊瑚藻礁类似, 垂向向光生长的特征与光合微生物一样	Saller <i>et al.</i> , 2016; Sabato Ceraldi and Green, 2016	这种特征与光合微生物相似, 能不能说明就是光合微生物的作用?
湖相化学成因	(1) 缺乏微生物特征, 与经典叠层石相似的微生物宏观结构岩心占比低于 1%, 薄片微观证据占比 0.05%	Wright and Barnett, 2015, 2020; Wright, 2022	
	(2) 未发现微生物结构和物质	Herlinger <i>et al.</i> , 2017; Farias <i>et al.</i> , 2019; Basso <i>et al.</i> , 2021; Netto <i>et al.</i> , 2022a; Rossoni <i>et al.</i> , 2024	
	(3) 树晶由密实的纤维状到叶片状晶体集合体构成, 球晶发育放射纤维状晶体结构	Wright and Barnett, 2015; Lima and De Ros, 2019; Farias <i>et al.</i> , 2019; Carvalho <i>et al.</i> , 2022; Rossoni <i>et al.</i> , 2024	
	(4) 镁质黏土具有均一的化学成分和高的有序度	Netto <i>et al.</i> , 2022a, 2022b	
湖相微生物和化学共同作用	(1) 类比碱性火山湖, East Kirkton 灰岩和 BVE 组一样, 发育方解石球晶	Mercedes-Martín <i>et al.</i> , 2017, 2019	(1) 不同于 BVE 组, East Kirkton 灰岩的球晶中含大量藻类包裹体; (2) 地球化学模拟, 镁质黏土主要为海泡石, 无法形成硅镁石沉淀
	(2) 类比微生物岩和热泉沉积, 球晶以微生物或它们的生物产物为核无机生长, 且皮层沉淀受到细菌的影响	Chafetz <i>et al.</i> , 2018; Kirkham and Tucker, 2018; Claes <i>et al.</i> , 2021	并不是所有球晶都有核, 很多球晶无核
	(3) 石膏的出现、方解石肺泡蜂窝状球晶结构、黄铁矿在球晶与基质接触处的优先富集以及球晶内部的穿孔现象, 表明在浅水蒸发沉积条件下存在细菌活动	Claes <i>et al.</i> , 2021	BVE 组未发现这些现象
	(4) 树晶在水体中纵向向光生长的强烈习性指示微生物光合作用驱动	Kirkham and Tucker, 2018	纵向向光生长是否就是微生物驱动?
	(5) 灌木状、乔木状、树枝状树晶发育纤维状结构, 为无机成因; 纹层状—柱状分支树晶显示类似于叠层石柱状中观构造的整体形态, 受到较大微生物的影响	Rodriguez-Berriguete <i>et al.</i> , 2022	结合高精度显微结构和原位 C-O 同位素, 进一步对比分析、确认各种形态树晶的成因
热泉钙华成因	(1) 1 口井 BVE 组下段识别出 12 m 厚的冷泉钙华沉积	Terra <i>et al.</i> , 2023	(1) 未发现热泉喷流相关的证据, 如瀑布特征、豆粒、碳酸盐浮石、喷口和气泡球, 大型水生植物等; (2) BVE 组碳酸盐岩区域性大面积分布, 不支持热泉沉积; (3) 树晶相与正常湖相沉积重复互层, 显示树晶相是正常的、可重复的湖相沉积; (4) 报道的 2 例冷泉钙华沉积是局部热液影响?
	(2) 1 口井 BVE 组上段识别出 12 个相, 3 个相组合, $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-4.8\text{‰} \sim +1.4\text{‰}$ ; $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-4.0\text{‰} \sim +1.5\text{‰}$ , 解释为热泉系统的中间—远端沉积	Fontaneta <i>et al.</i> , 2024	

不存在微生物活动。

### 3.2 湖相微生物成因

桑托斯盆地 BVE 组原位碳酸盐岩的微生物成因是由 Terra 等 (2010) 以岩石分类命名形式提出的。之后, 在坎波斯盆地同层位的 Macabu 组碳酸盐岩薄片观察到指示海藻或纤维状蓝藻细菌存在的具有微晶壁的丝状体, 并在图像测井中发现与“叠层石”结构相似的向上凸起的层状结构, 因此 Muniz (2013) 支持微生物成因这一观点, 并利用成像测井资料建立了陆相微生物沉积模式, 认为 4 种岩相分别形成于深水、中层水、浅水和近地表环境中, 其中叠层石发育于可以受到波浪影响的中层水环境中, 层纹石和页岩发育于风暴浪基面以下的深水环境中 (Muniz, 2013; Muniz and Bosence, 2015)。再后, 在大西洋东岸安哥拉宽扎 (Kwanza) 盆地同时期地层的部分树晶顶部识别出微晶化和侵蚀湾现象, Saller 等 (2016) 认为其可能与微生物活动有关。同时, 树晶向上垂向生长和形成沉积高地的能力与现代珊瑚和珊瑚藻礁类似, 垂向向光生长的特征与光合微生物类似, 因此也被作为树

晶为微生物成因的证据 (Sabato Ceraldi and Green, 2016; Saller *et al.*, 2016)。而对于球晶来说, 虽然其与镁质黏土共生, 但也可以单独存在, 故 Saller 等 (2016) 认为球晶沉淀于其他类型的湖底沉积物中, 甚至可能是微生物胶体中。

C-O 同位素研究显示, 大西洋两岸的 4 个盆地 (巴西桑托斯盆地和坎波斯盆地, 安哥拉宽扎盆地和卡宾达 (Cabinda) 盆地) 具有一致的 C-O 同位素特征 ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$  值主要在  $-3\text{‰} \sim +4\text{‰}$  之间,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$  值主要为  $0.5\text{‰} \sim 3.6\text{‰}$ , 图 7)。偏正的 C-O 同位素组成、未发现明显的海相化石、生物多样性低、微生物岩广泛发育、自生硅镁石发育, 指示原位碳酸盐岩形成于高盐、高碱、孤立的湖盆中 (Sabato Ceraldi and Green, 2016; Saller *et al.*, 2016)。

结合更多的文献调研结果来看, 原位碳酸盐岩为微生物成因的证据并不充分 (表 2), 每项证据均存在一定缺陷。例如, 证据 1 为薄片观察到具有微晶壁的丝状体 (Muniz, 2013), 这仅来自于少量岩心和井壁取心资料, 因此虽然局部可能发育微

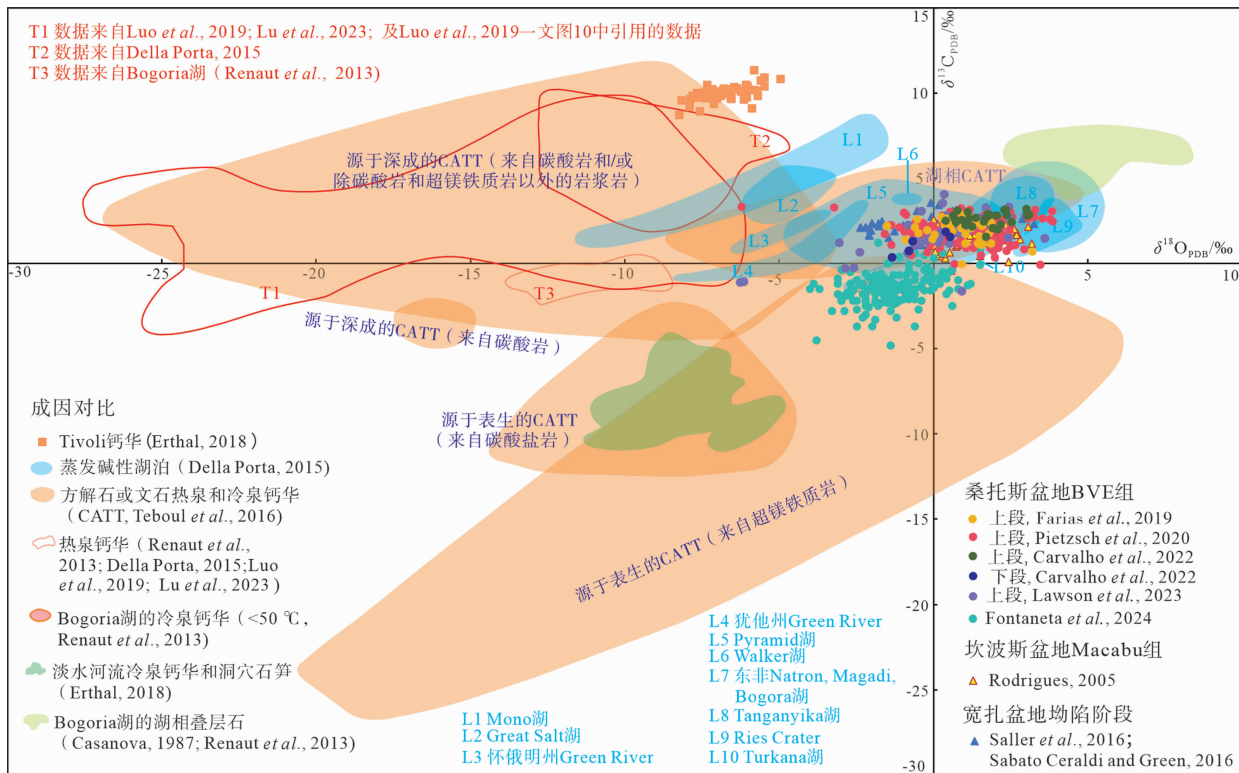


图 7 桑托斯盆地 BVE 组原位碳酸盐岩全岩 C-O 同位素组成及与世界范围内不同成因碳酸盐岩对比  
 Fig. 7 Whole-rock C-O isotope characteristics of in-situ carbonates of the BVE Formation in Santos Basin and comparison with carbonates of different origins worldwide

生物岩，但其空间分布范围尚不可知。证据 2 为图像测井中发现的向上凸起的层状结构 (Muniz, 2013)，但这种结构是否只有叠层石可以形成，且其空间分布范围如何，都需要进一步的研究。证据 3 为在部分树晶顶部识别出微晶化和侵蚀湾 (Saller *et al.*, 2016)，其与微生物活动产物相似，但是否为微生物作用形成还需更多证据；且即使是微生物作用形成的，但微晶化和侵蚀湾都发生在部分树晶的顶部，故只能说明部分树晶沉积晚期或沉积后受到微生物作用的影响，不能证明所有树晶都是微生物成因。证据 4 为树晶垂向向光生长的习性和形成沉积高地的能力 (Sabato Ceraldi and Green, 2016; Saller *et al.*, 2016)，虽然这种特征与光合微生物相似，但能否说明其就是光合微生物作用形成尚不确定。

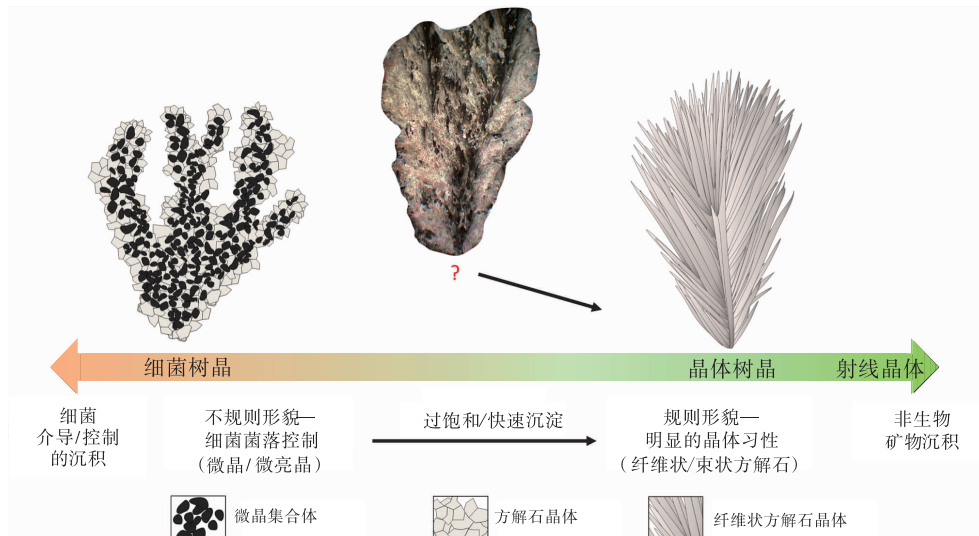
### 3.3 湖相化学成因

通过类比湖相微生物岩主要发育模式，Wright (2012) 对桑托斯盆地 BVE 组原位碳酸盐岩的微生物成因提出了质疑。他们对 Lula 地区多口钻井约 1400 m 岩心和超过 3400 张薄片的检查显示，BVE 组碳酸盐岩缺乏微生物特征，与经典叠层石相似的微生物宏观结构岩心占比低于 1%，薄片微观证据占比 0.05% (Wright and Barnett, 2015)，微生物岩(叠层石、树枝石、似核形石和层纹石)仅发现于 BVE 组顶部 20 ~ 30 m (Wright and Barnett,

2015; Wright, 2022)。后续大量研究也显示，在岩石组构中未发现明显的微生物结构和物质 (Herrlinger *et al.*, 2017; Farias *et al.*, 2019; Basso *et al.*, 2021; Netto *et al.*, 2022a; Rossoni *et al.*, 2024)。

广泛发育的树晶由密实的纤维状—叶片状晶体集合体构成，这与 Chafetz 和 Guidry (1999) 定义的晶体树晶 (crystal shrub) 非常相似 (图 8; Basso *et al.*, 2021)，而球晶则发育放射纤维状晶体结构。据此，大量学者解释和赞同树晶、球晶主要为化学成因，但不排除沉积过程中存在微生物的影响 (Wright and Barnett, 2015; Farias *et al.*, 2019; Lima and De Ros, 2019; Carvalho *et al.*, 2022; Rossoni *et al.*, 2024)。

在一些钻井中发现，BVE 组碳酸盐岩发育明显的韵律层序 (图 9)，该层序厚 0.75 ~ 5 m，主要由 3 个相组成，自下而上分别为薄层状含动物化石和硅质结核的钙质泥岩 (相 3)、球晶浮石岩 (相 2) 和树晶骨架灰岩 (相 1)，反映了其从洪泛开始到蒸发水体变浅的沉积过程。洪泛导致水体变深，湖水的碱度和盐度降低，介形类动物等可以生存，在较低能环境 (可能浪基面以下) 中沉积薄层钙质泥岩，并形成硅质结核 (相 3)；随着蒸发作用的进行，水体碱度和盐度升高，当 pH 值达到 10 时沉淀镁质黏土胶体 (Tutolo and Tosca, 2018)，球晶在胶体中成核并生长，形成球晶浮石岩 (相 2)；虽然镁质黏土胶体



微生物诱导/控制沉淀的树晶形态由微晶集合体和方解石粒状颗粒组成，  
非生物过饱和和快速沉淀的树晶形态由纤维状/束状或放射状方解石晶体组成

图 8 碳酸盐岩树晶形态与成因关系 (据 Chafetz and Guidry, 1999; Basso *et al.*, 2021)

Fig. 8 Relationship between morphology and genesis of shrubs within carbonates (after Chafetz and Guidry, 1999; Basso *et al.*, 2021)

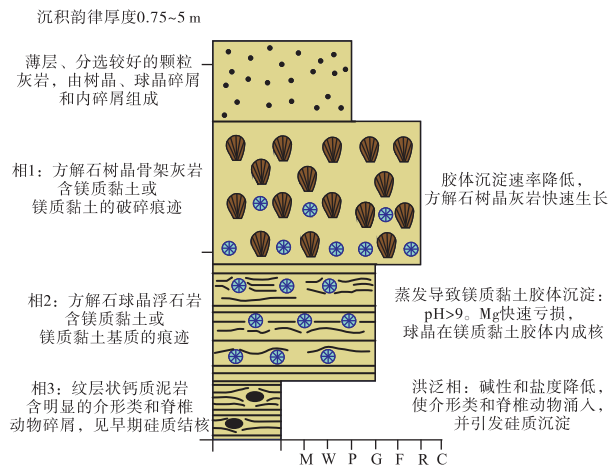


图9 桑托斯盆地 BVE 组碳酸盐岩沉积韵律

(据 Wright and Barnett, 2015; Wright, 2022)

Fig. 9 Carbonate sedimentary rhythm of the BVE Formation in Santos Basin (after Wright and Barnett, 2015; Wright, 2022)

沉淀时的基质不适合树晶成核和生长,但当镁质黏土胶体沉淀减少时,生长的球晶达到胶体-水界面,在相2的顶部形成球晶的不对称生长,并进一步长成树晶,形成树晶骨架灰岩(相1)(Wright and Barnett, 2015; Wright, 2022)。

对桑托斯盆地 BVE 组和相邻坎波斯盆地 Macabu 组碳酸盐岩的大量研究 (Herlinger *et al.*, 2017; Lima and De Ros, 2019; Carvalho *et al.*, 2022; Rossoni *et al.*, 2024; Schrank *et al.*, 2024) 也显示,球晶切断镁质黏土的纹层结构,且部分含镁质黏土包裹体,表明其为交代镁质黏土生长,是早期成岩阶段的产物。先沉积的镁质黏土作为基质,球晶在其中生长,其上同沉积的树晶。而部分树晶也切断了镁质黏土的纹层结构,说明这些树晶也形成于早期成岩环境中 (Carramal *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2022; Rossoni *et al.*, 2024; Schrank *et al.*, 2024)。

在 BVE 组顶部 50 m 厚的岩石中,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$  值为  $-2\text{‰} \sim +3\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$  值为  $1\text{‰} \sim 3\text{‰}$  (图 7), 与现今碱性湖泊相似;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为  $0.7133 \sim 0.7138$ , 且含球晶相中发现钾盐晶体,显示强烈的蒸发环境;依据团簇同位素测得的古温度为  $46 \sim 73\text{ }^\circ\text{C}$ , Farias 等 (2019) 解释碳酸盐沉淀时有热泉/热液进入湖水。结合岩相学特征,建立了 BVE 组碳酸盐岩的蒸发沉积模式,其不同于传统的石膏—石盐蒸发序列,而是体现为碳酸盐—石盐蒸发序列。Farias 等 (2019) 解释了这种不同寻常的转换,认为其源于

准同生期玄武岩风化形成的富含  $\text{HCO}_3^-$  的卤水和富含  $\text{CaCl}_2$  的热液卤水混合形成的混合卤水,使古湖泊在  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  浓度较低的情况下达到  $\text{CaCO}_3$  饱和,从而沉淀了大量灰岩。考虑到埋藏成岩过程中团簇同位素重排的可能性, Lawson 等 (2023) 则将 2 个最低温度 ( $36 \sim 38\text{ }^\circ\text{C}$ ) 解释为沉积温度,以此计算出湖水  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$  值为  $2\text{‰} \sim 5\text{‰}$ ,这与相对干旱炎热环境下高蒸发的湖水一致。

Wright (2022) 对碳酸盐岩的成因进行了综述,认为 BVE 组原位碳酸盐岩是显生宙地质记录中已识别出的形成于巨大超碱性湖泊系统的最大的化学碳酸盐工厂。可识别的微生物岩非常少,几乎所有碳酸盐岩都是化学成因,因此 BVE 组原位碳酸盐岩可能沉淀于由蒸发形成的超碱性浅湖水体中。碳酸盐组分很可能来自于镁铁质岩石的交代蚀变,如与大西洋张开相关的大陆溢流玄武岩;其组分中可能有一些更古老大陆基底的贡献,很可能也有地幔  $\text{CO}_2$  的重要贡献 (Wright, 2022)。

### 3.4 湖相微生物和化学成因

在承认 BVE 组原位碳酸盐岩树晶和球晶为化学成因的基础上,部分学者强调微生物在其生长过程中具有促进和/或驱动作用 (Mercedes-Martín *et al.*, 2017, 2019; Chafetz *et al.*, 2018; Kirkham and Tucker, 2018; Claes *et al.*, 2021)。

鉴于桑托斯盆地内发育大量玄武岩, Mercedes-Martín 等 (2017) 将其与苏格兰石炭系 East Kirkton 灰岩类比,建立了富含球晶的碱性火山湖沉积模式,认为方解石球晶成核发生在海滨区的沉积物和水体界面,由高碱度、富含 Ca-Mg 的水化学环境和微生物衍生的胶体胞外聚合物共同驱动,然而 East Kirkton 灰岩的球晶中含有丰富的藻类包裹体,镁质黏土不发育,岩石组构与 BVE 组有很大差异。Mercedes-Martín 等 (2019) 利用东非裂谷 Baringo 湖的化学数据模拟碱性火山湖的水化学演化,探讨了水体渗漏、湖泊蒸发和湖泊补给 (包括河流、热液和海水) 及部分二氧化碳压力的水深效应对 BVE 组湖相矿物组合静态沉淀的影响,且各影响因素占比改变会引起矿物组合的变化,这为认识 BVE 组湖水化学环境提供了很好的参考。模拟结果虽然可以产生球晶和镁质黏土沉淀,但镁质黏土主要为海泡石,不能形成硅镁石沉淀,表明

Baringo 湖的碱性火山湖泊环境难以达到 BVE 组沉积时期碳酸盐沉积的湖水化学环境。

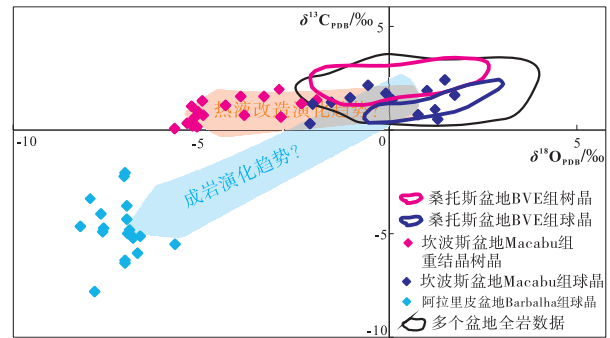
通过对多个热泉沉积和微生物岩的类比研究，有学者认为球晶是以微生物或它们的产物为核进行无机生长的，皮层沉淀过程受到细菌的影响 (Chafetz *et al.*, 2018; Kirkham and Tucker, 2018)。对巴西东北部阿拉里皮盆地富含有机质和黏土的碳酸盐质页岩中方解石球晶的微观研究也得出类似的结论 (Claes *et al.*, 2021)。在碳酸盐质页岩中石膏的出现、方解石肺泡蜂窝状球晶结构、黄铁矿在球晶与基质接触处的优先富集以及球晶内部的穿孔现象，表明在浅水蒸发沉积条件下存在细菌活动 (Claes *et al.*, 2021)，但在桑托斯盆地和相邻的坎波斯盆地，未见相关报道。

对于球晶的形成阶段则有不同的认识。类比研究依据未在球晶内发现沉积物包裹体、球晶之间为接触压实，认为球晶生长在水—沉积物界面，而非沉积物内部 (Chafetz *et al.*, 2018)。直接研究依据球晶与黏土层之间的切割关系，认为球晶形成于未固结到早成岩环境中；偏负的 C-O 同位素组成 ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$  值为  $-8.2\text{‰} \sim -5.7\text{‰}$ ， $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$  值为  $-7.8\text{‰} \sim -2.1\text{‰}$ ；图 10)，被解释为强烈的成岩改造 (Claes *et al.*, 2021)。

通过类比微生物岩，Kirkham 和 Tucker (2018) 认为树晶在水体中纵向向光生长的强烈习性指示微生物光合作用驱动，而非完全的非生物成因。通过树晶微观形态研究，Rodriguez-Berriguete 等 (2022) 认为不同形态的树晶成因也不相同：灌木状、乔木状和树枝状树晶发育纤维状结构，向外辐射排列，垂直或略微倾斜于基质生长，为无机成因，其中树枝状树晶与热泉沉积的树突结构相似，沉积时可能有水下热液的加入；纹层状—柱状分支树晶类似于叠层石柱状中观构造的整体形态，沉积时  $\text{CaCO}_3$  饱和度较低，受微生物影响较大。

### 3.5 热泉钙华成因

鉴于树晶晶体特征与现代热泉钙华非生物产物的相似性，多位学者探讨了 BVE 组原位碳酸盐岩热泉成因的可能性。Wright 和 Barnett (2015)、Farais 等 (2019) 发现 BVE 组碳酸盐岩缺乏热泉喷流来源的证据，如瀑布特征、豆粒、碳酸盐浮石、喷口和气泡球、大型水生植物等，认为形态结



桑托斯盆地 BVE 组树晶和球晶的数据引自 Gomes *et al.*, 2025; 坎波斯盆地 Macabu 组球晶和重结晶树晶的数据引自 Lima *et al.*, 2020; 阿拉里皮盆地 Barbalha 组球晶的数据引自 Claes *et al.*, 2021; 全岩数据引自 Rodrigues, 2005; Sabato Ceraldi and Green, 2016; Saller *et al.*, 2016; Farias *et al.*, 2019; Pietzsch *et al.*, 2020; Carvalho *et al.*, 2022; Lawson *et al.*, 2023

图 10 原位碳酸盐岩树晶和球晶的 C-O 同位素组成  
Fig. 10 C-O isotopic compositions of shroubs and spherulites within in-situ carbonates

构的相似性仅反映了类似的沉积过程，即源自高饱和度溶液的快速沉淀，而不是形成于热泉环境。同时，BVE 组层状碳酸盐岩的区域性大面积分布和丘状构造，亦不同于热泉沉积；碳酸盐岩氧同位素指示的低温沉积，也不符合热泉的高温特征；且树晶相与正常湖相沉积重复互层的沉积序列，显示树晶相是正常的、可重复的湖相沉积 (Saller *et al.*, 2016; Farias *et al.*, 2019)。以上证据均不支持 BVE 组树晶灰岩为热泉钙华沉积 (Sabato Ceraldi and Green, 2016; Pietzsch *et al.*, 2020)。

近年来出现冷泉钙华的报道。Terra 等 (2023) 在 Atpu 地区 1 口井的 BVE 组下段 90 m 厚的岩心上部识别出 12 m 厚的冷泉钙华沉积，并划分为植物冷泉钙华 (phytohermal tufa)、丝状冷泉钙华 (filamentous tufa)、似核形石冷泉钙华 (oncolith tufa) 和泡沫岩 (微生物垫) (foam rock) 4 个岩相，据此建立了热泉弧模型，并解释这套岩石形成于热泉弧的远端。Fontaneta 等 (2024) 在 Lula 地区 1 口井的 BVE 组上段中识别出 12 个微相和 3 个相组合 (阶地斜坡、平滑斜坡和积水平地)，结合 C-O 同位素组成 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$  值为  $-4.8\text{‰} \sim 1.4\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$  值为  $-4.0\text{‰} \sim 1.5\text{‰}$ ；图 7)，将其解释为热泉钙华沉积系统的中间到远端沉积，认为该岩石形成于近地表条件，流体来源于活动断层，沉积于高盐、碱性湖泊中，可能有甲烷渗透的贡献。

## 4 BVE 组原位碳酸盐岩研究：问题与展望

目前虽然对桑托斯盆地 BVE 组这类特殊原位碳酸盐岩的岩石组构、分类命名及组构和岩石的成因开展了大量研究，但一些关键科学问题尚未得到有效解决。

### 4.1 沉积环境

BVE 组原位碳酸盐岩的形成环境有湖相和热泉 2 种不同观点。多数研究成果支持其为湖相沉积（表 2），也依据未发现热泉喷流证据、岩石的区域性大范围分布、氧同位素组成和岩石的多层重复分布等证据，排除了这套碳酸盐岩为热泉钙华成因的可能性（Wright and Barnett, 2015; Sabato Ceraldi and Green, 2016; Saller *et al.*, 2016; Farias *et al.*, 2019; Pietzsch *et al.*, 2020），但近年来冷泉钙华的报道（Terra *et al.*, 2023; Fontaneta *et al.*, 2024）解释了部分地区存在热泉沉积环境。

全球不同沉积环境中的碳酸盐岩 C-O 同位素汇编（图 7）显示，除报道的冷泉钙华沉积（Fontaneta *et al.*, 2024）外，大部分原位碳酸盐岩的 C-O 同位素数据相互重叠，且分布在蒸发碱性湖泊范围内，同时也分布在湖相方解石或文石热泉和冷泉钙华沉积（calcitic or aragonitic travertine and tufa, 简称 CATT）范围内。湖相 CATT 的数据来源于有热液混入湖水形成的冷泉钙华沉积（Benson *et al.*, 1996; Li *et al.*, 2008）和湖相热液烟囱沉积（Stoffers and Botz, 1994; Dekov *et al.*, 2014），其岩相特征与原位碳酸盐岩明显不同，且空间分布局限，因此不支持区域性大面积分布的原位碳酸盐岩形成于湖相 CATT 环境，C-O 同位素组成的一致性可能是形成碳酸盐的不同来源物质的 C、O 同位素不同比例混合的结果。考虑到镁质黏土的稳定条件（pH 值大于 9, Tosca and Masterson, 2014; 或 pH 值为 10~10.5, Tutolo and Tosca, 2018）和岩石的 Sr 同位素特征（ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为 0.712~0.714, Pietzsch *et al.*, 2018; Farias *et al.*, 2019），支持原位碳酸盐岩沉积于蒸发碱性湖泊环境（图 7）。冷泉钙华沉积（Fontaneta *et al.*, 2024）分布在来自超镁铁质岩的表生 CATT 范围内，说明局部地区可能存在与超镁铁岩有关的热液流体的混入，但热液流体混入的时间是沉积时期还是成岩时期，目前尚不清楚。

### 4.2 湖水化学特征和物质来源

与组构和岩石成因相伴生的问题是形成 BVE 组碳酸盐沉积的湖水化学条件和物质来源。

BVE 组碳酸盐岩中生物多样性低（Sabato Ceraldi and Green, 2016）、未发现海相化石（Saller *et al.*, 2016）、沉积大量硅镁石和蜡蛇纹石（Tosca and Wright, 2014; Tutolo and Tosca, 2018; Carramal *et al.*, 2022）、高  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值（Pietzsch *et al.*, 2018; Farias *et al.*, 2019）及稳定的碳同位素组成（Pietzsch *et al.*, 2020），指示当时为高咸、高碱、高蒸发的湖泊环境（Sabato Ceraldi and Green, 2016; Saller *et al.*, 2016; Pietzsch *et al.*, 2018, 2020; Wright, 2022; Fontaneta *et al.*, 2024）。依据氧同位素的大范围变化（Sabato Ceraldi and Green, 2016; Saller *et al.*, 2016）和团簇同位素计算的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  值（Farias *et al.*, 2019），有学者解释当时的湖泊是封闭和孤立的，但该数据没有考虑氧同位素和团簇同位素受到后期成岩改造的影响，推测的可信度还有待考证。关于水体温度和深度目前探讨较少，尚需进一步研究。

BVE 组碳酸盐岩在大西洋两岸被动大陆边缘盆地中广泛发育，厚度达 500 m（Sabato Ceraldi and Green, 2016）。若要形成这样一套大范围、巨厚的碳酸盐沉积，需要巨量的 Mg、Si、Ca 和  $\text{CO}_2$ ，但对于这些物质的来源目前尚未有明确的认识（Carvalho *et al.*, 2022; Schrank *et al.*, 2024），仅提出几个可能的来源，包括早期溢流玄武岩的风化淋滤（Farias *et al.*, 2019; Gomes *et al.*, 2025）、盆内玄武岩的交代蚀变（Wright, 2022）、长英质大陆地壳（Pietzsch *et al.*, 2018）、海水渗流（Farias *et al.*, 2019）、地幔上涌和蛇纹石化（Lima *et al.*, 2020）等。

### 4.3 主要组分的形成机制

镁质黏土是最早的沉积产物已基本成为共识（Wright and Barnett, 2015; Carramal *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2022; Gomes *et al.*, 2025; Schrank *et al.*, 2024），但对镁质黏土的成因研究较少。镁质黏土形成于高碱性环境（pH 值为 10~10.5, Tutolo and Tosca, 2018），最初可能以胶体形式沉淀（Tosca and Masterson, 2014; Tosca and Wright, 2014），但沉积过程中是否有微生物参与尚未有定论。

方解石树晶也多被解释为沉积阶段产物（Ter-

ra *et al.*, 2010; Sabato Ceraldi and Green, 2016; Kirkham and Tucker, 2018; Farias *et al.*, 2019; Rodriguez-Berriguete *et al.*, 2022), 仅部分切断镁质黏土纹层结构的树晶被解释为早期成岩阶段产物 (Carramal *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2022; Rossoni *et al.*, 2024; Schrank *et al.*, 2024)。对树晶的成因争议较大, 多数研究认为以化学成因为主 (Wright and Barnett, 2015; Herlinger *et al.*, 2017; Farias *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2022; Rossoni *et al.*, 2024), 但也存在微生物成因为主 (Terra *et al.*, 2010; Muniz and Bosence, 2015; Sabato Ceraldi and Green, 2016; Saller *et al.*, 2016)、微生物和化学共同作用 (Kirkham and Tucker, 2018) 等不同观点, 还有研究认为不同形态的树晶成因也不一样 (Rodriguez-Berriguete *et al.*, 2022)。

对于方解石球晶的形成阶段, 大量研究成果支持其形成于早期成岩阶段 (Wright and Barnett, 2015; Herlinger *et al.*, 2017; Farias *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2022; Rossoni *et al.*, 2024), 但也有研究成果认为球晶是沉积阶段产物 (Saller *et al.*, 2016; Chafetz *et al.*, 2018; Terra *et al.*, 2023)。同样, 对于球晶的成因, 多数研究成果认为是化学成因为主 (Wright and Barnett, 2015; Herlinger *et al.*, 2017; Farias *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2022; Schrank *et al.*, 2024), 但也有研究认为是微生物和化学共同作用 (Chafetz *et al.*, 2018; Kirkham and Tucker, 2018; Claes *et al.*, 2021; Terra *et al.*, 2023) 或微生物成因为主 (Saller *et al.*, 2016)。

总体来说, 目前对于岩石 3 个主要组分的形成阶段争议较小, 但对其成因争议较大, 焦点是各类组分形成过程中微生物是否参与及其发挥的作用。微生物结构微小, 被方解石捕获后很快就腐败分解 (Krumbein *et al.*, 1977; Krumbein, 1979), 现今在岩石中难以找到微生物存在的证据, 仅在微生物被捕获处可能会留下微米级的孔隙 (Chafetz, 2013), 而这种微米级的孔隙在薄片尺度为主的微观研究中难以识别, 尚需要开展高分辨率的显微结构和图像分析 (Chafetz *et al.*, 2018)。另外, 切断镁质黏土纹层结构的球晶和树晶被认为生长在尚未固结的镁质黏土中, 解释为早期成岩环境产物 (Wright and Barnett, 2015; Herlinger *et al.*, 2017; Lima and De Ros, 2019; Carvalho *et al.*, 2022;

Schrank *et al.*, 2024)。严格来讲, 这些球晶和树晶是否生长于准同生成岩环境, 它们的同位素组成能否代表湖水化学条件, 目前尚未见讨论。虽然对树晶和球晶的原位 C-O 同位素研究较少, 但有限的数据显示不同盆地中的树晶和球晶 C-O 同位素组成存在差异 (图 10), 其中桑托斯盆地 BVE 组树晶和球晶具有不同的 C-O 同位素分布区间, 均分布在全岩范围内; 坎波斯盆地 Macabu 组的球晶也多分布在全岩范围内, 但与 BVE 组球晶分布范围不同, 其分散在 BVE 组树晶和球晶分布范围内; Macabu 组的树晶发生了重结晶作用, 氧同位素明显负偏; 阿拉里皮盆地 Barbalha 组球晶则具有明显偏负的 C-O 同位素组成, 可能受到强烈的成岩改造 (Claes *et al.*, 2021)。上述特征说明树晶和球晶的 C-O 同位素组成受到后期成岩和/或热液的改造会发生明显改变, 故研究过程中需要注意对后期成岩和/或热液作用的甄别, 同时不同地区和/或不同层位的树晶和球晶的 C-O 同位素特征可能存在一定差异, 这也需要更多的工作来证实。

#### 4.4 未来研究方向

基于对 BVE 组原位碳酸盐岩主要组分和岩石成因的认识和科学问题的梳理, 笔者建议下一步应聚焦以下研究方向。

1) 环境介质参数的恢复和获取。目前对湖水化学的研究取得了一些定性的成果, 但相关的 C-O-Sr-团簇同位素数据均基于全岩分析, 包含了大量的成岩信息。建议下一步针对沉积组开展配套的原位同位素分析, 获得相对准确的环境介质参数, 更为确切地反映岩石沉积时的湖水环境条件。同时, 加强对近现代相同类型岩石和沉积环境的考察和对比, 以今论古, 协助恢复 BVE 组沉积时的湖水化学环境。

2) 碳酸盐岩物质来源分析。形成 BVE 组原位碳酸盐岩需要巨量的 Mg、Si、Ca 和 CO<sub>2</sub>。考虑到氧同位素对温度比较敏感, 下一步建议采用沉积组分的原位镁同位素、硅同位素、钙同位素和碳同位素, 结合配套的数值模拟, 综合示踪岩石的物质来源。

3) 主要组分的成因。目前研究中采用的薄片尺度微观研究和全岩同位素分析, 不仅难以观察到组构的精细结构, 也难以排除后期埋藏和/或热液成岩作用 (Lima *et al.*, 2020; Carvalho *et al.*, 2022; Gomes *et al.*, 2025) 的影响。考虑到球晶核心的有

不及树晶的复杂形态,建议在精细微观岩相学研究的基础上,配套开展高精度显微结构和图像分析及原位主微量、同位素测试,对不同特征的主要组分进行对比研究,并开展配套的矿物生长实验(Mercedes-Martín *et al.*, 2021, 2022),以明确其成因及差异。

4) 岩石的成因。BVE组原位碳酸盐岩是在特定构造阶段和古气候条件下地质综合作用的产物。因此,建议在上述微观研究、配套实验和配套数值模拟及现代考察的基础上,结合岩石的时空分布及盆地古构造、古气候变化等地球动力学因素,综合分析这套岩石的成因问题。

## 5 结论

1) 桑托斯盆地 BVE 组原位碳酸盐岩主要由方解石树晶、方解石球晶和镁质黏土组成,其分类命名方案存在微生物分类和无机分类的巨大争议。

2) 原位碳酸盐岩的岩石成因存在湖相微生物成因、湖相化学成因、湖相微生物和化学共同作用、热泉钙华成因等不同观点。越来越多的研究成果支持湖相化学成因为主的观点,但微生物是否参与及其参与的过程、机制和功效尚不清楚,局部是否发育热泉钙华沉积也需要更多的证据。

3) 古生物化石、自生黏土矿物、C-O-Sr 同位素等指标的综合研究显示, BVE 组碳酸盐沉积环境为高盐、高碱、高蒸发的湖泊,但水体温度和深度、Mg-Si-Ca 等物质来源、碳酸盐形成阶段或沉积一成岩叠加过程和效应等尚不清楚。

4) 以环境介质参数、物质来源、主要组分成因等研究为切入点,开展配套的高精度显微特征、原位主微量元素和多系列同位素分析,配套实验和数值模拟,结合多尺度时空分布研究和现代考察,是认识 BVE 组原位碳酸盐岩成因和形成演化的重要途径。

**致谢** 本文得益于3位审稿专家提出的建设性修改意见,在此表示诚挚的感谢!

## 参考文献 (References)

窦立荣,温志新,王兆明,贺正军,宋成鹏,陈瑞银,阳孝法,刘小兵,刘祚冬,陈燕燕. 2024. 桑托斯盆地盐下孤立碳酸盐台地沉积建造与深水大油田. 石油勘探与开发, 51(4): 829-840. [Dou L R, Wen Z X, Wang Z M, He Z J, Song C P, Chen R Y, Yang X F, Liu X

B, Liu Z D, Chen Y Y. 2024. Sedimentary build-ups of pre-salt isolated carbonate platforms and formation of deep-water giant oil fields in Santos Basin, Brazil. *Petroleum Exploration and Development*, 51(4): 829-840]

冯志强,郭金瑞,田琨,刘静静,张忠民,田纳新,吴高奎,宫越. 2024. 被动大陆边缘盆地油气勘探进展. 地质学报, 98(3): 957-974. [Feng Z Q, Guo J R, Tian K, Liu J J, Zhang Z M, Tian N X, Wu G K, Gong Y. 2024. Review of petroleum exploration progress in passive marginal basins. *Acta Geologica Sinica*, 98(3): 957-974]

郭建宇,郝洪文,李晓萍. 2009. 南美洲被动大陆边缘盆地的油气地质特征. 现代地质, 23(5): 916-922. [Guo J Y, Hao H W, Li X P. 2009. Geologic characteristic of hydrocarbon in the passive continental marginal basins of South America. *Geoscience*, 23(5): 916-922]

何赛,李国蓉,吴昌荣,刘树根,张忠民,苏玉山,朱奕璇,何钊,任杰,王雨辰,周伟,王亚捷. 2022. 巴西桑托斯盆地湖相微生物碳酸盐岩层序沉积特征及控制因素. 石油勘探与开发, 49(4): 683-692. [He S, Li G R, Wu C R, Liu S G, Zhang Z M, Su Y S, Zhu Y X, He Z, Ren J, Wang Y C, Zhou W, Wang Y J. 2022. Sedimentary filling characteristics and controlling factors of lacustrine microbial carbonates sequence in the Santos Basin, Brazil. *Petroleum Exploration and Development*, 49(4): 683-692]

黄继新,徐芳,齐梅,童强,郭松伟,罗强. 2023. 巴西 M 油田白垩系湖相碳酸盐岩沉积相类型及分布. 海相油气地质, 28(1): 45-54. [Huang J X, Xu F, Qi M, Tong Q, Guo S W, Luo Q. 2023. Types and distribution of sedimentary facies of the Cretaceous carbonate reservoirs in the M Oilfield of Santos Basin, Brazil. *Marine Origin Petroleum Geology*, 28(1): 45-54]

贾怀存,康洪全,梁建设,程涛,张世鑫. 2021. 桑托斯盆地湖相碳酸盐岩储层特征及控制因素. 西南石油大学学报(自然科学版), 43(2): 1-9. [Jia H C, Kang H Q, Liang J S, Cheng T, Zhang S X. 2021. Characteristic and developmental controlled factors of pre-salt lacustrine carbonate, Santos Basin. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 43(2): 1-9]

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. Characteristics and main control factors of hydrocarbon accumulation in Santos Basin, Brazil. *China Offshore Oil and Gas*, 28(4): 1-8]

康洪全,吕杰,程涛,贾怀存,白博. 2018. 巴西桑托斯盆地盐下湖相碳酸盐岩储层特征. 海洋地质与第四纪地质, 38(4): 170-178. [Kang H Q, Lü J, Cheng T, Jia H C, Bai B. 2018. Characters of pre-salt lacustrine carbonate reservoir, Santos Basin, Brazil. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(4): 170-178]

罗晓彤,文华国,彭才,李云,赵研. 2020. 巴西桑托斯盆地 L 油田 BV 组湖相碳酸盐岩沉积特征及高精度层序划分. 岩性油气藏, 32(3): 68-81. [Luo X T, Wen H G, Peng C, Li Y, Zhao Y. 2020. Sedimentary characteristics and high-precision sequence division of lacustrine carbonate rocks of BV Formation in L oilfield of Santos Basin, Brazil. *Lithologic Reservoirs*, 32(3): 68-81]

孙海涛,黄小洁,杨柳,范国章,黄小娟,王红平,钟大康,周思宇. 2023. 巴西桑托斯盆地地下白垩统湖相碳酸盐岩球粒-树枝状组

- 构特征与成因. 古地学报, 25(5): 1199-1210. [Sun H T, Huang X J, Yang L, Fan G Z, Huang X J, Wang H P, Zhong D K, Zhou S Y. 2023. Spherulite-dendritic crystal characteristics and its genesis of the Lower Cretaceous lacustrine carbonate rocks in Santos Basin, Brazil. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(5): 1199-1210]
- 汪新伟, 邬长武, 郭永强, 孟庆强, 张云霞, 陶冶. 2013. 巴西桑托斯盆地卢拉油田成藏特征及对盐下勘探的启迪. 中国石油勘探, 18(3): 61-69. [Wang X W, Wu C W, Guo Y Q, Meng Q Q, Zhang Y X, Tao Y. 2013. Accumulation feature of Lula Oilfield and its exploratory implication for pre-salt reservoirs in Santos Basin, Brazil. *China Petroleum Exploration*, 18(3): 61-69]
- 杨柳, 范国章, 王红平, 左国平, 李林, 王朝锋, 张勇刚, 庞旭, 丁梁波, 王思文, 李伟强, 宋叙, 黄小洁, 孙海涛. 2023. 巴西桑托斯盆地白垩系 Barra Velha 组湖相碳酸盐岩沉积特征及成因环境研究. 世界地质, 42(4): 701-713. [Yang L, Fan G Z, Wang H P, Zuo G P, Li L, Wang C F, Zhang Y G, Pang X, Ding L B, Wang S W, Li W Q, Song X, Huang X J, Sun H T. 2023. Research on sedimentary characteristics and genetic environment of lacustrine carbonate rocks of Cretaceous Barra Velha Formation in Santos Basin, Brazil. *World Geology*, 42(4): 701-713]
- 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. Facies model of lacustrine microbial carbonates: a case study from A oilfield, Santos Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 48(3): 413-422]
- 朱奕璇, 张忠民, 张德民. 2022. 巴西桑托斯盆地早白垩世微生物碳酸盐岩沉积环境与成因. 岩石学报, 38(9): 2619-2633. [Zhu Y X, Zhang Z M, Zhang D M. 2022. Sedimentary environment and genesis of the Early Cretaceous microbial carbonates in Santos Basin, Brazil. *Acta Petrologica Sinica*, 38(9): 2619-2633]
- Anjos S M C, Sombra C L, Spadini A R. 2024. Petroleum exploration and production in Brazil: from onshore to ultra-deepwaters. *Petroleum Exploration and Development*, 51(4): 796-806.
- Azerêdo A C, Duarte L V, Silva A P. 2021. The challenging carbonates from the Pre-Salt reservoirs offshore Brazil: facies, palaeoenvironment and diagenesis. *Journal of South American Earth Sciences*, 108: 103202.
- Basso M, Belila A M P, Chinelatto G F, da Ponte Souza J P, Vidal A C. 2021. Sedimentology and petrophysical analysis of pre-salt lacustrine carbonate reservoir from the Santos Basin, southeast Brazil. *International Journal of Earth Sciences*, 110(7): 2573-2595.
- Benson L, White L D, Rye R. 1996. Carbonate deposition, Pyramid Lake subbasin, Nevada: 4. comparison of the stable isotope values of carbonate deposits (tufas) and the Lahontan lake-level record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 122: 45-76.
- Bontognali T R R, Vasconcelos C, Warthmann R J, Bernasconi S M, Dupraz C, Strohmenger C J, McKenzie J A. 2010. Dolomite formation within microbial mats in the coastal sabkha of Abu Dhabi (United Arab Emirates). *Sedimentology*, 57(3): 824-844.
- Buckley J P, Bosence D, Elders C. 2015. Tectonic setting and stratigraphic architecture of an Early Cretaceous lacustrine carbonate platform, Sugar Loaf High, Santos Basin, Brazil. *Geological Society, London, Special Publications*, 418(1): 175-191.
- Burne R V, Moore L S, Christy A G, Troitzsch U, King P L, Carnerup A M, Hamilton P J. 2014. Stevensite in the modern thrombolites of Lake Clifton, Western Australia: a missing link in microbialite mineralization? *Geology*, 42(7): 575-578.
- Carramal N G, Oliveira D M, Cabela A S M, Cuglieri M A A, Rocha N P, Viana S M, Toledo S L V, Pedrinha S, De Ros L F. 2022. Palaeoenvironmental insights from the deposition and diagenesis of Aptian pre-salt magnesium silicates from the Lula Field, Santos Basin, Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, 92(1): 12-31.
- Carvalho A M A, Hamon Y, De Souza Jr O G, Carramal N G, Collard N. 2022. Facies and diagenesis distribution in an Aptian pre-salt carbonate reservoir of the Santos Basin, offshore Brazil: a comprehensive quantitative approach. *Marine and Petroleum Geology*, 141: 105708.
- Chaboureau A C, Guillocheau F, Robin C, Rohais S, Moulin M, Aslanian D. 2013. Paleogeographic evolution of the central segment of the South Atlantic during Early Cretaceous times: paleotopographic and geodynamic implications. *Tectonophysics*, 604: 191-223.
- Chafetz H S. 2013. Porosity in bacterially induced carbonates: focus on micropores. *AAPG Bulletin*, 97: 2103-2111.
- Chafetz H S, Guidry S A. 1999. Bacterial shrubs, crystal shrubs, and ray-crystal shrubs: bacterial vs. abiotic precipitation. *Sedimentary Geology*, 126(1): 57-74.
- 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.
- Chang H K, Kowsmann R O, Figueiredo A M F, Bender A. 1992. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. *Tectonophysics*, 213(1-2): 97-138.
- Claes H, Miranda T, 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.
- De Ros L F, Oliveira D M. 2023. An operational classification system for the South Atlantic pre-salt rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 93(10): 693-704.
- Dekov V M, Egueh N M, Kamenov G D, Bayon G, Lalonde S V, Schmidt M, Liebetrau V, Munnik F, Fouquet Y, Tanimizu M, Awaleh M O, Guirreh I, Le Gall B. 2014. Hydrothermal carbonate chimneys from a continental rift (Afar Rift): mineralogy, geochemistry, and mode of formation. *Chemical Geology*, 387: 87-100.
- Della Porta G. 2015. Carbonate build-ups in lacustrine, hydrothermal and fluvial settings: comparing depositional geometry, fabric types and geochemical signature. *Geological Society, London, Special Publications*, 418(1): 17-68.
- Erthal M M. 2018. Travertine shrub structures: origin, diagenetic modifications and petrophysical characteristics: Tivoli case (Central Italy).

- Doctoral dissertation of Katholieke Universiteit Leuven; 5–59.
- Farias F, Szatmari P, Bahniuk A, Franca A B. 2019. Evaporitic carbonates in the pre-salt of Santos Basin: genesis and tectonic implications. *Marine and Petroleum Geology*, 105: 251–272.
- Folk R L. 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin: Hemphill Publishing.
- Fontaneta G T, Figueiredo M F, Vieira L C, Falcão L C, de Oliveira E C, Gorla F F L. 2024. Unusual stable carbon and oxygen isotope signature of Brazilian pre-salt travertine: depositional and geochemical significances. *Chemical Geology*, 663: 122281.
- Gomes J P, Bunevich R B, Tedeschi L R, Tucker M E, Whitaker F F. 2020. Facies classification and patterns of lacustrine carbonate deposition of the Barra Velha Formation, Santos Basin, Brazilian pre-salt. *Marine and Petroleum Geology*, 113: 104176.
- Gomes J P B, Bunevich R B, Sartorato A C L, Tedeschi L R, Tonietto S N, Tucker M E, Whitaker F. 2025. Early diagenetic evolution based on petrography and stable isotope analysis in the Barra Velha Formation of the Brazilian pre-salt. *The Depositional Record*, 11: 70–94.
- Herlinger R J, Zambonato E E, De Ros L F. 2017. Influence of diagenesis on the quality of Lower Cretaceous pre-salt lacustrine carbonate reservoirs from northern Campos Basin, offshore Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, 87(12): 1285–1313.
- Kirkham A, Tucker M E. 2018. Thrombolites, spherulites and fibrous crusts (Holkerian, Purbeckian, Aptian): context, fabrics and origins. *Sedimentary Geology*, 374: 69–84.
- Krumbein W E. 1979. Photolithotropic and chemoorganotrophic activity of bacteria and algae as related to beachrock formation and degradation (Gulf of Aqaba, Sinai). *Geomicrobiology Journal*, 1: 139–203.
- Krumbein W E, Cohen Y, Shilo M. 1977. Solar Lake (Sinai): 4. stromatolitic cyanobacterial mats. *Limnology and Oceanography*, 22(4): 635–656.
- Lawson M, Sitgreaves J, Rasbury T, Wooton K, Esch W, Marcon V, Henares S, Konstantinou A, Kneller E, Gombosi D, Torres V, Silva A, Alevato R, Wren M, Becker S, Eiler J. 2023. New age and lake chemistry constraints on the Aptian pre-salt carbonates of the central South Atlantic. *Geological Society of America Bulletin*, 135(3–4): 595–607.
- Li H C, Xu X M, Ku T L, You C F, Buchheim H P, Peters R. 2008. Isotopic and geochemical evidence of palaeoclimate changes in Salton Basin, California, during the past 20 kyr: 1.  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  records in lake tufa deposits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259: 182–197.
- Lima B E M, De Ros L F. 2019. Deposition, diagenetic and hydrothermal processes in the Aptian pre-salt lacustrine carbonate reservoirs of the northern Campos Basin, offshore Brazil. *Sedimentary Geology*, 383: 55–81.
- Lima B E M, Tedeschi L R, Silva Pestilho A L, Santos R V, Vazquez J C, Poley Guzzo J V, De Ros L F. 2020. Deep-burial hydrothermal alteration of the pre-salt carbonate reservoirs from northern Campos Basin, offshore Brazil: evidence from petrography, fluid inclusions, Sr, C and O isotopes. *Marine and Petroleum Geology*, 113: 104143.
- Lu Z P, Wen H G, Luo L C, Li L, Nie Y. 2023. Geochemical characterization of laminated crystalline crust travertines formed by  $\text{Ca}^{2+}$ -deficient hot springs at Sobcha (China). *Minerals*, 13(2): 220.
- Luo L C, Wen H G, Li Y, You Y X, Luo X T. 2019. Mineralogical, crystal morphological, and isotopic characteristics of smooth slope travertine deposits at Reshuitang, Tengchong, China. *Sedimentary Geology*, 381: 29–45.
- Meisling K E, Cobbold P R, Mount V S. 2001. Segmentation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos Basins, southeastern Brazil. *AAPG Bulletin*, 85(11): 1903–1924.
- Mercedes-Martín R, Brasier A T, Rogerson M, Reijmer J J G, Vonhof H, Pedley M. 2017. A depositional model for spherulitic carbonates associated with alkaline, volcanic lakes. *Marine and Petroleum Geology*, 86: 168–191.
- Mercedes-Martín R, Ayora C, Tritlla J, Sánchez-Román M. 2019. The hydrochemical evolution of alkaline volcanic lakes: a model to understand the South Atlantic pre-salt mineral assemblages. *Earth-Science Reviews*, 198: 102938.
- Mercedes-Martín R, Rogerson M, Prior T J, Brasier A T, Reijmer J J G, Billing I, Matthews A, Love T, Lepley S, Pedley M. 2021. Towards a morphology diagram for terrestrial carbonates: evaluating the impact of carbonate supersaturation and alginic acid in calcite precipitate morphology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 306: 340–361.
- Mercedes-Martín R, Rao A, Rogerson M, Sánchez-Román M. 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.
- Moulin M, Aslanian D, Untermeier P. 2010. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean. *Earth-Science Reviews*, 98(1–2): 1–37.
- Muniz M C. 2013. Tectono-stratigraphic evolution of the Barremian-Aptian continental rift carbonates in southern Campos Basin, Brazil. Doctoral dissertation of University of London; 205–227.
- Muniz M C, Bosence D W J. 2015. Pre-salt microbialites from the Campos Basin (offshore Brazil): image log facies, facies model and cyclicity in lacustrine carbonates. In: Bosence D W J, Gibbons K A, Le Heron D P, Morga W A N, Pritchard T, Vining B A (eds). *Microbial Carbonates in Space and Time: Implications for Global Exploration and Production*. Geological Society, London, Special Publications, 418: 221–242.
- Netto P R A, Pozo M, da Silva M D, Boscato Gomes M E, Mexias A, Ramnani C W, Parizek-Silva Y, Borghi L, Rios-Netto A D M. 2022a. Palaeoenvironmental implications of authigenic magnesian clay formation sequences in the Barra Velha Formation (Santos Basin, Brazil). *Minerals*, 12(2): 200.
- Netto P R A, Pozo M, da Silva M D, Mexias A S, Gomes M E B, Borghi L, Rios-Netto A M. 2022b. Authigenic Mg-clay assemblages in the Barra Velha Formation (Upper Cretaceous) from Santos Basin (Brazil): the role of syngenetic and diagenetic process. *Applied Clay Science*, 216: 106339.
- Pace A, Bourillot R, Bouton A, Vennin E, Galaup S, Bundeleva I, Patrier P, Dupraz C, Thomazo C, Sansjofre P, Yokoyama Y, Franceschi M, Anguy Y, Pigot L, Virgone A, Visscher P T. 2016. Microbial and di-

- agenetic steps leading to the mineralisation of Great Salt Lake microbialites. *Scientific Reports*, 6: 31495.
- Pietzsch R, Oliveira D M, Tedeschi L R, Queiroz Neto J V, Figueiredo M F, Vazquez J C, de Souza R S. 2018. Palaeohydrology of the Lower Cretaceous pre-salt lacustrine system, from rift to post-rift phase, Santos Basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 507: 60–80.
- Pietzsch R, Tedeschi L R, Oliveira D M, dos Anjos C W D, Vazquez J C, Figueiredo M F. 2020. Environmental conditions of deposition of the Lower Cretaceous lacustrine carbonates of the Barra Velha Formation, Santos Basin (Brazil), based on stable carbon and oxygen isotopes: a continental record of  $p\text{CO}_2$  during the onset of the Oceanic Anoxic Event 1a (OAE 1a) interval? *Chemical Geology*, 535: 119457.
- Rebello T B, Batezelli A, Mattos N H, Leite E P. 2023. Sedimentary processes and paleoenvironment reconstruction of the Barra Velha Formation, Santos Basin, Brazilian pre-salt. *Marine and Petroleum Geology*, 150: 106141.
- Renaut R W, Owen R B, Jones B, Tiercelin J J, Tarits C, Ego J K, Konhauser K O. 2013. Impact of lake-level changes on the formation of thermogenic travertine in continental rifts: evidence from Lake Bogoria, Kenya Rift Valley. *Sedimentology*, 60(2): 428–468.
- Rodrigues R. 2005. Chemostratigraphy. In: Koutsoukos E A M (ed). *Applied Stratigraphy*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 165–178.
- Rodriguez-Berriguete A, Dal'Bo P F, Valle B, Borghi L. 2022. When distinction matters: carbonate shrubs from the Aptian Barra Velha Formation of Brazilian's pre-salt. *Sedimentary Geology*, 440: 106236.
- Rossoni R B, Porcher C C, Koester E, Sobiesiak J S, da Silva L A C, Mexias A S, Gomes M E B, Ramnani C W, De Ros L F. 2024. The role of compaction in the diagenetic evolution of pre-salt Aptian deposits of Santos Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, 466: 106650.
- Sabato Ceraldi T, Green D. 2016. Evolution of the South Atlantic lacustrine deposits in response to Early Cretaceous rifting, subsidence and lake hydrology. In: Sabato Ceraldi T, Hodgkinson R A, Backe G E (eds). *Petroleum Geoscience of the West Africa Margin*. Geological Society, London, Special Publications, 438: 77–98.
- Saller A, Rushton S, Buambua L, Inman K, McNeil R, Dickson J A D. 2016. Presalt stratigraphy and depositional systems in the Kwanza Basin, offshore Angola. *AAPG Bulletin*, 100(7): 1135–1164.
- Schrank A B S, Dos Santos T, Altenhofen S D, Freitas W, Cembrani E, Haubert T, Dalla Vecchia F, Barili R, Rodrigues A G, Maraschin A J, De Ros L F. 2024. Interactions between clays and carbonates in the Aptian pre-salt reservoirs of Santos Basin, eastern Brazilian margin. *Minerals*, 14(2): 191.
- Souza-Egipsy V, Wierzechos J, Ascaso C, Neelson K H. 2005. Mg-silica precipitation in fossilization mechanisms of sand tufa endolithic microbial community, Mono Lake (California). *Chemical Geology*, 217(1–2): 77–87.
- Stoffers P, Botz R. 1994. Formation of hydrothermal carbonate in Lake Tanganyika, East-Central Africa. *Chemical Geology*, 115: 117–122.
- Teboul P A, Durllet C, Gaucher E C, Virgone A, Girard J P, Curie J, Lopez B, Camoin G F. 2016. Origins of elements building travertine and tufa: new perspectives provided by isotopic and geochemical tracers. *Sedimentary Geology*, 334: 97–114.
- Terra G J S, Spadini A R, Frana A B, Sombra C L, Winter W R. 2010. Carbonate rock classification applied to Brazilian sedimentary basins. *Boletim de Geociências-Petrobras*, 18(1): 9–29.
- Terra S A, da Silva D R L, Ribeiro A, Borghi L. 2023. The lower Barra Velha Formation (Aptian) in the Atapu Field, Santos Basin: geological model for a pre-salt succession. *Journal of South American Earth Sciences*, 131: 104589.
- Tosca N J, Masterson A L. 2014. Chemical controls on incipient Mg-silicate crystallization at 25 °C: implications for early and late diagenesis. *Clay Minerals*, 49(2): 165–194.
- Tosca N J, Wright V P. 2014. The formation and diagenesis of Mg-clay minerals in lacustrine carbonate reservoirs. *American Association of Petroleum Geologists Annual Convention and Exhibition*. Houston, Texas, USA #51002.
- Tutolo B M, Tosca N J. 2018. Experimental examination of the Mg-silicate-carbonate system at ambient temperature: implications for alkaline chemical sedimentation and lacustrine carbonate formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 225: 80–101.
- Wright V P. 2012. Lacustrine carbonates in rift settings: the interaction of volcanic and microbial processes on carbonate deposition. *Geological Society, London, Special Publications*, 370(1): 39–47.
- Wright V P. 2022. The mantle,  $\text{CO}_2$  and the giant Aptian chemogenic lacustrine carbonate factory of the South Atlantic: some carbonates are made, not born. *Sedimentology*, 69(1): 47–73.
- Wright V P, Barnett A J. 2015. An abiotic model for the development of textures in some South Atlantic early Cretaceous lacustrine carbonates. In: Bosence D W J, Gibbons K A, Le Heron D P, Morgan W A, Pritchard T, Vining B A (eds). *Microbial Carbonates in Space and Time: Implications for Global Exploration and Production*. Geological Society, London, Special Publications, 418: 209–219.
- Wright V P, Barnett A J. 2017. Classifying reservoir carbonates when the status quo simply does not work: a case study from the Cretaceous of the South Atlantic. *AAPG Annual Convention and Exhibition*, Houston, Texas, USA #51419.
- Wright V P, Barnett A J. 2020. The textural evolution and ghost matrices of the Cretaceous Barra Velha Formation carbonates from the Santos Basin, offshore Brazil. *Facies*, 66(1): 7.
- Casanova J. 1987. Travertins et stromatolites: Les travertines. *Bulletin des centres de recherches exploration-Production Elf-Aquitaine*.
- Moreira J L P, Madeira C V, Gil J A, Machado M A P. 2007. Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15: 531–549.