

微生物碳酸盐岩“三因素”控储地质认识和分布规律

沈安江^{1,2}, 胡安平^{1,2}, 张杰^{1,2}, 王小芳^{1,2}, 王慧^{1,2}

(1. 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023; 2. 中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江杭州 310023)

摘要:微生物碳酸盐岩是非常重要的油气储层, 针对叠层石和凝块石碳酸盐岩比其他类型微生物碳酸盐岩和非微生物碳酸盐岩具有优质储层发育潜力这一科学问题, 通过现代微生物碳酸盐沉积特征和现代盐湖碳酸盐沉积特征研究、微生物有机质早期低温降解和晚期热解生酸模拟实验、早期沉淀和交代白云石成因模拟实验, 揭示了微生物碳酸盐岩因沉积物和沉积环境的特殊性, 储层成因也有其特殊性, 提出了“三因素”控储地质认识。①与其他类型微生物碳酸盐岩和非微生物碳酸盐岩相比, 叠层石和凝块石碳酸盐岩具有更高的初始孔隙度和微生物有机质丰度, 为储层发育奠定了物质基础; ②微生物有机质早期低温降解和晚期热解生酸使初始孔隙在沉积后得以保存和进一步扩溶, 这是叠层石和凝块石碳酸盐岩储层发育的关键; ③早期白云石化有利于孔隙的保存, 碳酸盐岩-膏盐岩体系微生物碳酸盐沉积易于发育早期沉淀和交代两类低温白云石, 这是叠层石和凝块石白云岩储层主要发育于碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系中的原因。这些认识为微生物碳酸盐岩储层分布预测提供了依据, 也揭示了微生物碳酸盐岩储层比非微生物碳酸盐岩储层具有更佳的储层发育潜力。碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系叠层石和凝块石发育相带是微生物碳酸盐岩储层有利分布区。

关键词:早期低温降解; 晚期热解; 早期白云石化; 碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系; 微生物碳酸盐岩

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

“Three-factor” driven microbial carbonate reservoirs and their distribution

Shen Anjiang^{1,2}, Hu Anping^{1,2}, Zhang Jie^{1,2}, Wang Xiaofang^{1,2}, Wang Hui^{1,2}

(1. Hangzhou Institute of Petroleum Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 2. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: Microbial carbonates are very important hydrocarbon reservoirs. Stromatolite and thrombolite carbonates are commonly suggested to be better hydrocarbon reservoirs than other microbial and no-microbial carbonates. To check the truth of the suggestion, this study characterizes some modern microbial deposits and salt lake deposits, and performs simulated experiments of early degradation and buried pyrolysis of microbial organic matter, and genesis of dolomites by early precipitation and replacement. The results confirm the suggestion and reveal the uniqueness of microbial carbonate reservoirs with their special sediments and depositional setting. Three factors that control the formation of the reservoir are also proposed. (1) Compared with other microbial and no-microbial carbonates, stromatolite and thrombolite carbonates contain more original pores and microbial organic matter and therefore have a better material basis for becoming hydrocarbon reservoirs. (2) The production of organic acid by early degradation and later pyrolysis of microbial organic matter helps preserving and enhancing the original porosity, serving as a key factor for the development of stromatolite and thrombolite carbonate reservoirs. (3) Early dolomitization favors the preservation of pre-burial porosity and two types of low-temperature dolomitization (early deposition and replacement) tend to occur in carbonate-evaporite sedimentary sequences, which result in the development of stromatolite and thrombolite reservoirs in these sequences. The understanding is of great significance to the prediction of distribution of microbial carbonate reservoirs, based on which stromatolite and thrombolite zones are suggested to be promising hydrocarbon reservoirs in carbonate-evaporite sedimentary sequences.

收稿日期: 2021-04-17; 修订日期: 2022-03-10。

第一作者简介: 沈安江(1965—), 男, 博士、教授级高级工程师, 碳酸盐沉积储集层。E-mail: shenaj_hz@petrochina.com.cn。

通讯作者简介: 胡安平(1982—), 女, 博士、高级工程师, 碳酸盐岩储集层研究与地球化学实验技术研发。E-mail: huap_hz@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05004-002); 中国石油天然气股份有限公司直属院所基础研究和战略储备技术研究基金项目(2018D-5008-03); 中国石油天然气股份有限公司科技项目(2019-5009-16)。

Key words: early low-temperature degradation, late pyrolysis, early dolomitization, carbonate-evaporite sedimentary system, microbial carbonates

引用格式: 沈安江, 胡安平, 张杰, 等. 微生物碳酸盐岩“三因素”控储地质认识和分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 582-596. DOI: 10.11743/ogg20220308.

Shen Anjiang, Hu Anping, Zhang Jie, et al. “Three-factor” driven microbial carbonate reservoirs and their distribution[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 582-596. DOI: 10.11743/ogg20220308.

微生物碳酸盐沉积是由底栖的原核或真核微生物群落通过捕获或粘结碎屑颗粒,或由微生物引发的碳酸盐沉淀而成的碳酸盐沉淀物^[1-2]构成微生物碳酸盐沉积的微生物组分主要包括细菌、藻类、真菌、参与生物膜和微生物席生长的物质^[3]。微生物碳酸盐岩(尤指叠层石)最早出现在接近3 500 Ma前的太古宙地层中^[4-5],在中、新元古代达到丰度、形态种类和分布范围的高峰期,大量微生物碳酸盐岩发育于中、新元古代和早古生代^[6]。

Riding(2000)^[2]将微生物碳酸盐岩划分为叠层石、凝块石、树枝石和均一石4类。Kalkowsky(1908)^[7]定义的叠层石为内部结构呈纹层状紧密排列的生物沉积灰岩。Riding(2011)^[8]根据叠层石的内部结构、宏观特征和微生物沉积之间的作用方式等特点,将叠层石细分为骨骼叠层石、粘结叠层石、细粒叠层石、泉华叠层石、陆生叠层石5类。凝块石指宏观上呈凝块状的底栖微生物沉积,这种微生物碳酸盐岩有着不规则的颗粒形态,可细分为钙化微生物凝块石、粗糙粘结凝块石、树枝凝块石、泉华凝块石、沉积后-生物扰动形成的凝块石、增生型凝块石和次生凝块石7类^[2]。树形石由微生物钙化而成,不是由颗粒粘结而成,呈厘米级灌木状枝体。均一石是一种相对无结构、隐晶质或泥晶质、宏观结构缺少清晰纹层、凝块或树枝状结构的微生物碳酸盐沉积。

梅冥相(2007)^[9]将核形石和纹理石补充到微生物碳酸盐岩中,建立了微生物碳酸盐岩的六分方案。纹理石是指发育纹理化构造的泥晶灰岩,纹理化构造单个纹理的厚度在0.5~1.5 mm,是一种未受改造的有机纹理,明显不同于水平状叠层石(纹理石)。核形石是指由微生物粘结或引发碳酸盐沉淀形成的球状、椭球状核形构造,大小为毫米到厘米级,常与凝块石共生,发育于前寒武纪及显生宙地层中,杨仁超(2011)^[10]将核形石分为椭球状同心纹层核形石、椭圆形不规则纹层核形石、叶状不连续纹层核形石及迷雾状核形石等4种类型。

Shapiro(2000)^[11]按照构造尺度将微生物碳酸盐岩划分为大型构造(>1 m)、中型构造(0.5~1 m)、小型

构造(1~50 cm)和微型构造(<1 cm)4类。大型构造指微生物碳酸盐岩形成的岩层特征,如微生物层、微生物丘等;中型构造指微生物碳酸盐岩的形态特征,如柱状、穹窿状、锥状、团块状等;小型构造指中型构造内部用肉眼能够观察到的微生物碳酸盐岩结构,如波状、纹层状、泡沫状、叠层状等;微型构造指显微镜下能够观察到的微生物碳酸盐岩显微结构与组分,包括钙化微生物残留体、沉积物和胶结物等。

微生物碳酸盐岩不仅与许多金属矿床(如Fe和Mn等矿床)的形成和富集密切相关^[12],而且还是非常重要的油气储层,美国阿拉巴马州、东西伯利亚地区、巴西桑托斯盆地、阿曼盐盆、哈萨克斯坦以及中国的四川盆地和华北地区在微生物碳酸盐岩储层中均有重大油气发现。东西伯利亚地区新元古界发育晚里菲期和晚文德期两套微生物白云岩储层,孔隙度达到10%以上,油气可采储量达 $22 \times 10^8 \text{ t}$ ^[13],四川盆地灯影组微生物白云岩储层的天然气储量规模在万亿方以上,孔隙度达到6%~12%^[14],华北任丘、牛东地区蓟县系微生物白云岩储层的孔隙度达到10%~15%^[15]。勘探实践证实,中国微生物碳酸盐岩储层主要发育于叠层石和凝块石白云岩中^[16-18],展示了叠层石和凝块石白云岩比其他类型微生物碳酸盐岩和非微生物碳酸盐岩具有更高的优质储层发育潜力。

碳酸盐岩储层可划分为礁滩、岩溶和白云岩储层,多孔的礁滩相沉积是储层发育的基础,孔隙主要形成于沉积(原生孔隙)和表生环境(表生溶孔),埋藏溶蚀和热液作用对孔隙的改造具有建造和破坏双重性,是先存孔隙调整的场所,而且埋藏溶蚀孔洞沿先存孔隙发育带分布,白云岩储层的储集空间主要是对原岩孔隙的继承和调整,但早期白云石化作用有利于先存孔隙的保存^[19]。以上这些碳酸盐岩储层发育的主要控制因素同样也是微生物碳酸盐岩储层发育的主要因素,但因沉积物和沉积环境的特殊性,微生物碳酸盐岩储层成因也有其特殊性。前人对微生物碳酸盐岩的研究停留在岩石成因、分类、沉积环境和共性的储层发育控制因素上^[20-22],对微生物碳酸盐岩储层成因的特殊性和分布规律研究甚少。但微生物碳酸盐岩储层作为

一类非常特殊的储层类型,与非微生物碳酸盐岩储层相比具有更高的储层发育潜力,尤其是凝块石和叠层石白云岩储层,除上述共性的储层成因机理认识同样适用于微生物碳酸盐岩储层外,肯定有其成因特殊性,这是由其高初始孔隙度、富微生物有机质和易于发生早期白云石化的特性所决定的,这也是本文的研究目的和意义。

针对叠层石和凝块石碳酸盐岩比其他类型微生物碳酸盐岩和非微生物碳酸盐岩具有更高储层发育潜力这一科学问题,本文通过现代微生物碳酸盐沉积特征和现代盐湖碳酸盐沉积特征研究、微生物有机质早期低温降解和晚期热解生酸模拟实验、早期沉淀和交代白云石成因模拟实验,探索微生物白云岩储层成因的特殊性,提出了“三因素”控储地质认识,为微生物碳酸盐岩储层分布预测提供了依据。碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系中,叠层石和凝块石发育相带是微生物碳酸盐岩储层有利分布区。

1 现代沉积研究和模拟实验

本文开展了现代巴哈马台地微生物碳酸盐沉积特征研究、内蒙古新巴尔虎左3个盐湖和6个非盐湖沉积物特征比较研究、微生物有机质早期低温降解生酸和晚期热解生烃、生酸两组模拟实验、微生物诱导原白云石沉淀模拟实验,为认识叠层石和凝块石碳酸盐岩比

其他类型微生物碳酸盐岩和非微生物碳酸盐岩具有更高储层发育潜力、叠层石和凝块石白云岩储层主要分布于碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系的原因提供线索。

1.1 现代沉积物特征

1.1.1 现代微生物沉积物特征

本文作者考察了巴哈马台地Crooked岛上的一个潟湖,湖面最宽处近400 m,长近1.7 km(图1a),湖底最深60 cm,温度25~35℃,盐度35‰~40‰,湖水平静,几乎不受波浪或潮汐作用的影响^[23]。湖底中央为石化的微生物灰岩,主要为柱状和穹窿状叠层石灰岩,湖底边缘为半固结的微生物灰岩,主要为水平-波状叠层石灰岩,湖岸为半固结的碳酸盐泥结壳(图1b),上覆于新近系生屑和鲕粒滩之上。

湖底中央石化的柱状和穹窿状叠层石灰岩,据10个样品的物性测试,最大孔隙度达到55%,最小孔隙度为15%,平均孔隙度达到40%(图1c),湖底边缘半固结的水平-波状叠层石沉积,据7个样品的物性测试,最大孔隙度达到65%,最小孔隙度为55%,平均孔隙度可以达到60%(图1d)。湖岸(时而暴露,时而被湖水淹没)半固结的碳酸盐泥沉积,据8个样品的物性测试,最大孔隙度达到20%,最小孔隙度为5%,平均孔隙度达到10%。

湖底中央石化的柱状和穹窿状叠层石灰岩,微生物有机质含量可以达到30%~40%,其余为捕获的灰

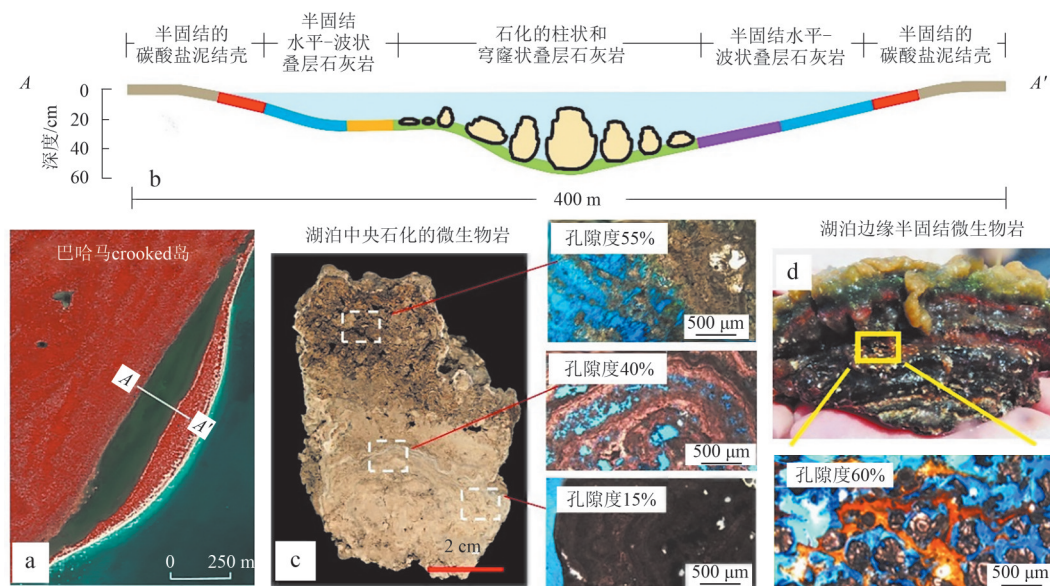


图1 巴哈马台地Crooked岛潟湖微生物沉积特征

Fig. 1 Microbial sedimentary characteristics in a lagoon of Crooked Island, Bahamas platform

a. 巴哈马Crooked岛潟湖分布和形态特征; b. 潟湖横剖面,展示潟湖的深度和沉积相带分异; c. 湖泊中央石化的柱状和穹窿状叠层石灰岩的宏观和微观特征,富微生物有机质,初始孔隙发育; d. 湖泊边缘半固结水平-波状叠层石灰岩的宏观和微观特征,富微生物有机质,初始孔隙发育

泥、钙化的微生物及微生物诱导形成的碳酸盐沉积,按平均孔隙度40%计算,微生物有机质的体积可以占到岩石总体积的18%~24%(图1c)。湖底边缘半固结的水平-波状叠层石沉积,格架部分微生物有机质的含量与碳酸盐岩沉积物含量相当,按平均孔隙度60%计算,微生物有机质的体积可以占到岩石总体积的20%(图1d)。湖岸半固结的碳酸盐泥沉积,因低水位期的暴露、暴晒(巴哈马台地位于赤道附近)和海水作用,往往形成结壳,结壳成分以碳酸钙为主,只能见到微生物有机质的痕迹,微生物有机质的体积占到岩石总体积5%~10%。

现代微生物沉积研究揭示湖底固结或半固结的叠层石灰岩(或沉积物)与湖岸半固结的碳酸盐泥相比,具有更高的初始孔隙度和微生物有机质含量。按照将今论古的原则,地质历史时期的叠层石灰岩(或微生物沉积物)同样应该具有更高的初始孔隙度和微生物有机质含量。

1.1.2 现代盐湖沉积物特征

本文作者考察了内蒙古吉布胡郎图诺尔、噶布金托呼各克和都兰油泥泉3个盐湖,塔日根、塔日根诺尔、达布散诺尔、敦德诺尔、布日德诺尔和呼吉日诺尔6个淡水湖泊(图2a)。3个盐湖中央湖水的盐度分别为60‰,120‰和100‰,盐湖边缘受降雨和淡水注入的影响,湖水盐度小于35‰。每个盐湖从湖底中央到

湖底边缘各钻取两筒心(共6筒心),心长25 cm(图2b)。取心沉积物主体为灰泥沉积,几乎见不到微生物的痕迹,X射线衍射结果揭示,盐湖边缘3筒心从底至顶,沉积物的矿物成分除灰泥(方解石)和泥质(粘土矿物)外,还有石英和钠长石矿物,未见白云石和石盐矿物(图2d)。盐湖中央3筒心中上部(0~8 cm),沉积物的矿物成分与盐湖边缘3筒心相同,下部(8~25 cm),沉积物的矿物成分还出现了白云石和石盐矿物,白云石矿物X射线衍射峰值为30.95°(图2c,e),白云石含量随深度增加而逐渐增大,镜下观察白云石含量最大达到30%~40%。6个淡水湖泊从湖底中央到边缘各钻取两筒心(共12筒心),取心沉积物主体为灰泥(方解石)和泥质(粘土矿物)沉积,出现叠层状微生物痕迹,X射线衍射结果揭示,无论是湖底中央还是边缘、无论是取心上部还是下部,沉积物的矿物成分除灰泥(方解石)和泥质(粘土矿物)外,还出现了石英和钠长石矿物,未见白云石和石盐矿物。

现代盐湖和淡水湖泊沉积物特征揭示了以下3点认识:①无论是盐湖还是淡水湖泊,没有微生物作用的条件下,表层沉积物中没有发现原白云石沉淀;②从表层沉积物中缺原白云石分析,湖底中央下部(8~25 cm)沉积物中的白云石矿物是准同生期交代成因的,高盐度可能是交代白云石形成的主控因素;③在淡水湖泊水体(低盐度)中,即使有微生物的作用,也没有发现原白云石沉淀及交代白云石。

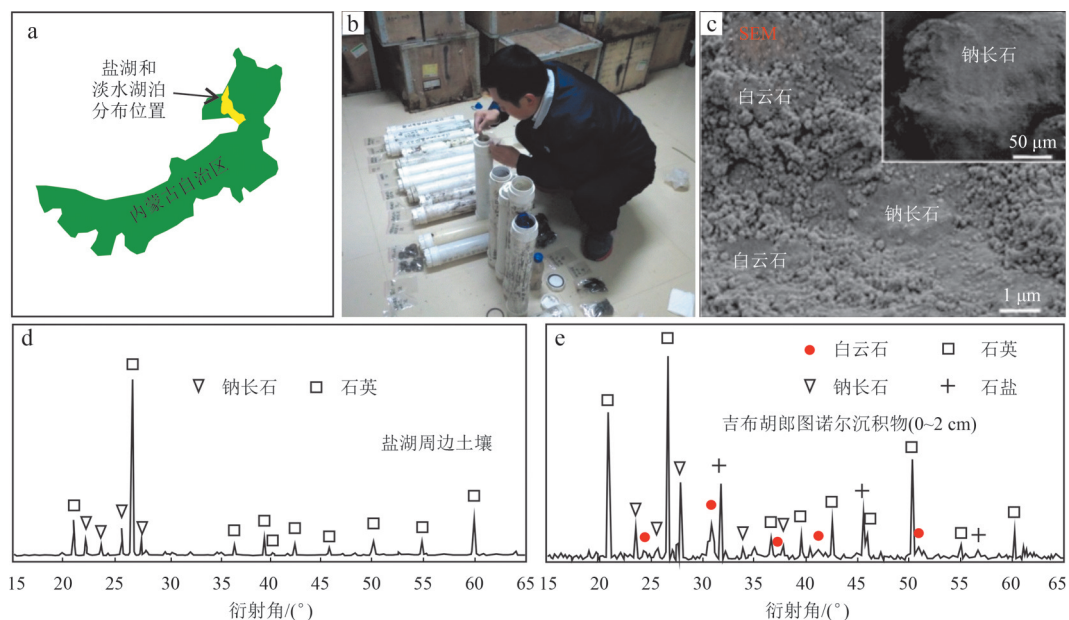


图2 现代盐湖沉积物特征

Fig. 2 Characteristics of sediments in a modern salt lake

a. 3个盐湖和6个淡水湖泊分布; b. 从湖泊中央到湖泊边缘钻取的18筒心,全为松散的沉积物; c. 盐湖中央沉积物(下部)扫描电镜图像,白云石和钠长石; d. 盐湖边缘沉积物X射线衍射图谱,未检测到白云石; e. 盐湖中央沉积物(下部)X射线衍射图谱,出现白云石峰

1.2 微生物有机质生酸模拟实验

1.2.1 微生物有机质早期低温降解生酸模拟实验

本次模拟实验采用铜绿微囊藻作为准同生-早成岩期微生物有机质低温降解的有机质来源,铜绿微囊藻(15 mL)购自中科院水生生物研究所,配置BG11培养基进行微生物培养,并经一系列物理化学处理后,制得冻干的铜绿微囊藻粉和螺旋藻,冰箱冷藏备用。

微生物有机质降解的菌株及培养环境见表1,模拟自然界常见的自然水解、有氧降解、硝酸盐还原、Fe氧化物还原4个阶段的微生物有机质降解作用。自然水解用时7 d,有氧降解用时30 d,硝酸盐还原用时28 d,Fe氧化物还原用时30 d。分别模拟叠层石灰岩微生物有机质降解(图3a)、凝块石灰岩微生物有机质降解(图3b)的产物及丰度。整个模拟方案的设计、模拟过程、降解产物及含量的测试非常复杂,将另文陈述。

表1 用于微生物有机质降解的菌株及培养环境

Table 1 The bacterial strain type and culture environment for the microbial organic matter degradation

菌株	培养基	培养环境
氨化细菌	蛋白胨 10.0 g/L, 牛肉膏 3.0 g/L, NaCl 5.0 g/L, pH 7.0~7.2, 0.100 MPa, 121 °C灭菌20 min, 制得液体培养基	有氧, 37 °C
硝酸盐还原细菌	KNO ₃ 2.0 g/L, 柠檬酸钠 10.0 g/L, K ₂ HPO ₄ 1.0 g/L, KH ₂ PO ₄ 1.0 g/L, pH 7.2~7.4	厌氧, 28 °C
Fe还原细菌	胰蛋白胨(酪蛋白胰酶消化物)15.0 g, 大豆蛋白胨(大豆粉末蛋白酶消化物)5.0 g, 氯化钠 5.0 g, pH 7.3±0.2, 121 °C灭菌15 min	厌氧, 30 °C

模拟实验揭示微生物灰岩类型、微生物有机质早期低温降解途径对微生物有机质生酸强度和类型均有重要的控制作用(图4)。自然水解路径无论是叠层石灰岩还是凝块石灰岩,生酸强度均低,有机酸类型单一,且各不相同。有氧降解路径凝块石灰岩的生酸强度明显高于叠层石灰岩,虽然有机酸类型依旧相对单一,但完全一致。硝酸盐还原路径无论是叠层石灰岩还是凝块石灰岩,生酸强度均达到高峰,有机酸类型多样,但各不相同。Fe氧化物还原路径生酸强度介于有氧降解路径和硝酸盐还原路径之间,有机酸类型多样,但各不相同。

凝块石灰岩和叠层石灰岩具有较高的生酸强度,尤其是凝块石灰岩,这与不同类型微生物灰岩中微生物有机质丰度的差异有关。巴哈马台地现代微生物沉积物特征研究已经揭示叠层石灰岩具有很高的微生物有机质丰度,湖岸半固结碳酸盐泥的微生物有机质含量很低。层(席)状和丘状微生物灰岩的沉积背景可以与湖岸半固结碳酸盐泥沉积类比,均处于时而暴露时而淹没的沉积环境,不利于微生物的繁盛,虽然未做微生物有机质早期低温降解生酸模拟实验,但生酸强度应该远小于叠层石灰岩。凝块石灰岩的沉积水深大于叠层石灰岩的^[24-25],故巴哈马台地现代微生物沉积未见凝块石灰岩,但可以推测凝块石灰岩微生物有机质含量不亚于叠层石灰岩,并导致凝块石灰岩的生酸强度高于叠层石灰岩。纹理石灰岩是指发育纹理化构造(0.5~1.5 mm)的泥晶灰岩,其沉积水深大于凝块石灰岩^[26-27],往往与黑色泥岩伴生,有机质含量很高,

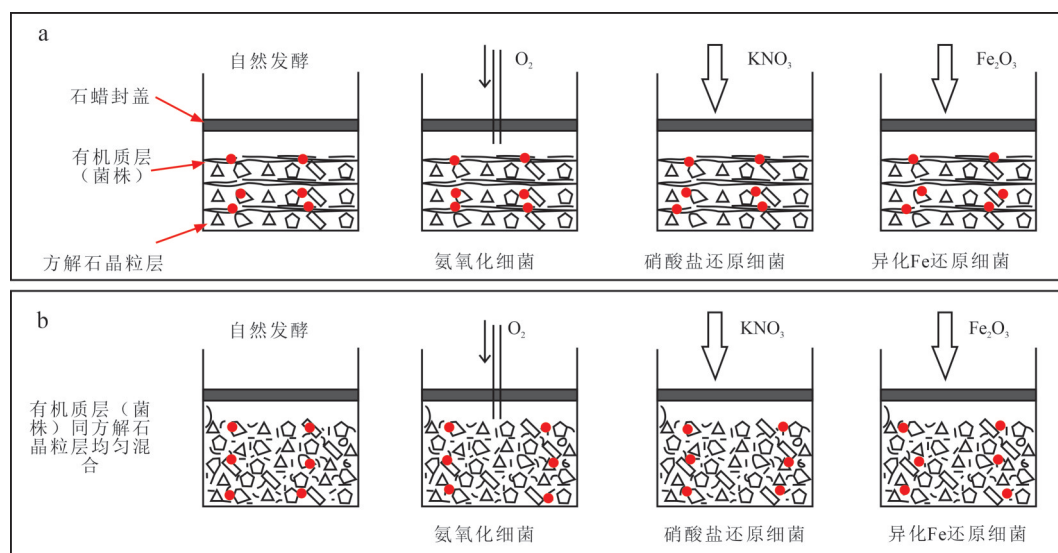


图3 微生物有机质低温降解生酸模拟实验示意图

Fig. 3 Simulation experiment of acid generation through microbial organic matter degradation

a. 叠层石灰岩中微生物有机质早期低温降解生酸模拟实验; b. 凝块石灰岩中微生物有机质早期低温降解生酸模拟实验

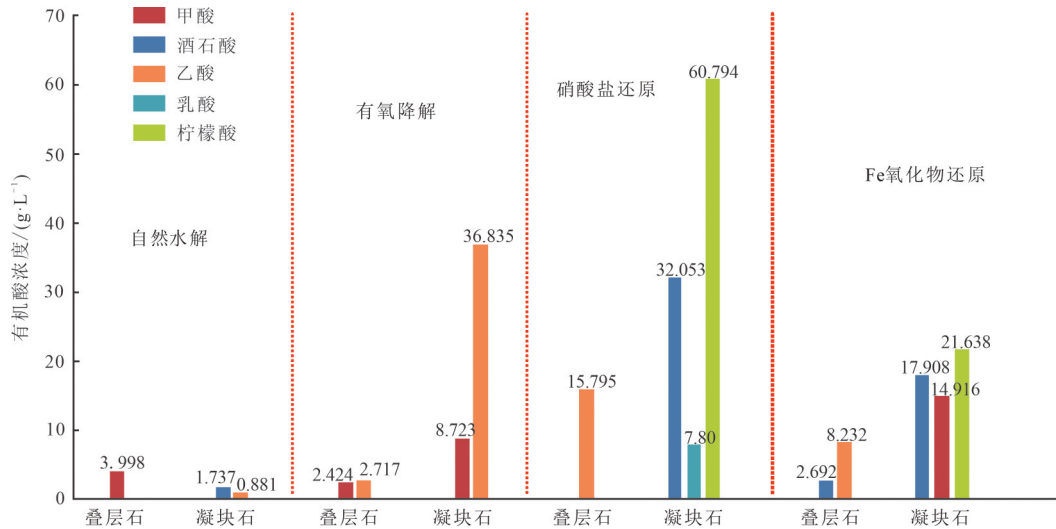


图4 叠层石和凝块石灰岩微生物有机质低温降解路径与降解产物、有机酸浓度关系

Fig. 4 Relationship between microbial organic matter degradation pathways, degradation products and acid concentration

可以成为好的烃源岩,但不能作为储层,有机质晚期热解生烃过程中可以有大量有机酸伴生,对紧邻烃源岩的储集层有改造作用。

微生物有机质类型和丰度相同的微生物灰岩,生酸强度从大到小依次为硝酸盐还原作用、Fe氧化物还原作用、有氧降解作用、自然水解的作用,干旱气候背景条件下的碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系有利于硝酸盐还原生酸作用和Fe氧化物还原生酸作用的发生。

综上所述,不同类型的微生物灰岩受微生物有机质丰度和降解途径的不同,生酸强度和类型有很大的差异,碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系凝块石和叠层石灰岩的生酸强度最大。

1.2.2 微生物有机质晚期热解生酸模拟实验

选取3组样品,开展微生物岩生烃和生酸模拟实验研究。第一组为取自柴达木盆地古近系的藻灰岩样, TOC 为0.30%, S_1 为0.04 mg/g, S_2 为0.18 mg/g, HI 为60 mg/g, R_o 为0.42%;第二组为取自泌阳凹陷古近系灰色泥岩, TOC 为2.64%, S_2 为15.83 mg/g, HI 为600 mg/g, R_o 为0.38%;第三组为取自禄劝茂山剖面的中二叠统泥灰岩, TOC 为3.33%, S_1 为1.11 mg/g, S_2 为13.9 mg/g, HI 为403 mg/g, R_o 为0.42%。

3组样品现今处于未成熟-低成熟阶段,地质历史上未经历生烃高峰,是生烃和生酸模拟实验的理想样品。3组样品分别为藻灰岩(微生物岩)、泥灰岩和灰色泥岩,代表3种不同岩性热解过程中的生烃和生酸潜力。实验结果(图5)揭示藻灰岩(微生物岩)的油产率、烃气产率均不亚于灰色泥岩、泥灰岩,具备生烃的潜力。模拟实验进一步揭示,藻灰岩(微生物岩)热解

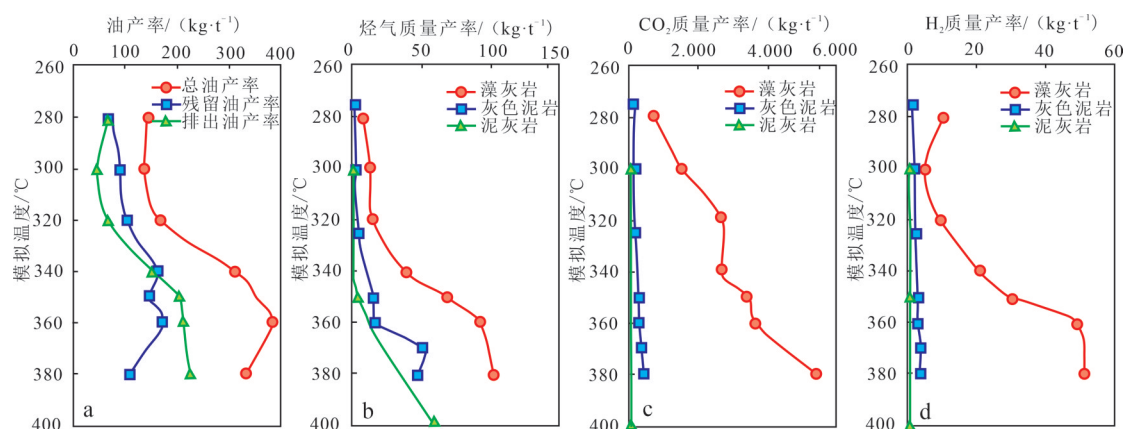
生烃过程中还伴生 CO_2 气体和有机酸的生成,而且产率远大于灰色泥岩和泥灰岩。

1.3 微生物诱导原白云石沉淀模拟实验

Land(1998)^[28]指出在地表温压条件下($<50\text{ }^{\circ}\text{C}$,数米深压力),经过32a的地质作用过程,也未能通过无机途径产生原白云石沉淀。这使人们把目光转向有机成因上,并开展了微生物诱导白云石沉淀实验。微生物无处不在,微生物灰岩的存在足以说明并不是所有的微生物都能诱导白云石沉淀,可能与特殊类型的微生物有关。Vasconcelos等(1995)^[29]通过实验指出硫酸盐还原菌能够诱导白云石的沉淀,Warthmann等(2005)^[30]通过实验指出产甲烷菌能够诱导白云石的沉淀,Kenward等(2013)^[31]将实验室沉淀的白云石与拉戈阿韦梅利亚咸化海岸的白云石进行比较,两者具相似的球形和低有序度特征,进而推断特殊类型的微生物(硫酸盐还原菌、产甲烷菌)是沉淀原白云石的条件。

考虑到古老微生物白云岩主要发育于碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系,与高盐度有关,本文开展了嗜盐古菌诱导原白云石沉淀实验,发现高嗜盐古菌细胞浓度、高盐度、介质高Mg/Ca是碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系诱导早期低温原白云石沉淀的重要条件。

本文用于诱导原白云石沉淀的三株嗜盐古菌分别为*Natrinema* sp. J7-1, J7-3, LJ7,成矿条件为 Ca^{2+} 浓度10.0 mM, Mg^{2+} 浓度100.0 mM, CO_3^{2-} 浓度20 mM, SO_4^{2-} 浓度分别为0, 1.0, 29.8, 100 mM, 温度 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, 转速150 r/min, 培养时长72 h。在相同盐度(200‰)条件下,*Natrinema* sp. J7-1, J7-3, LJ7细胞浓度(OD_{600})分别为0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5(细胞浓度用吸光度表示,测试波

图5 藻灰岩(微生物岩)、灰色泥岩、泥灰岩热解生烃和生酸模拟实验结果^[49]Fig. 5 Pyrolysis experiments of hydrocarbon and acid generation in algal limestone (microbial carbonates), grey mudstone and muddy limestone samples^[49]

a. 藻灰岩地层孔隙热压模拟油产率特征; b. 藻灰岩、灰色泥岩和泥灰岩烃气产率对比; c. 藻灰岩、灰色泥岩和泥灰岩 CO_2 产率对比; d. 藻灰岩、灰色泥岩和泥灰岩 H_2 产率对比

长为 600 nm, 即 OD_{600})。实验结果显示, *Natrinema* sp. J7-1, J7-3, LJ7 三株嗜盐古菌诱导原白云石沉淀的细胞浓度(OD_{600})下限分别为 1.5, 2.5 和 1.5 (图 6a—c)。本文还开展了嗜盐古菌细胞浓度相同的条件下, 随盐度变化的原白云石沉淀情况, 给定嗜盐古菌 *Natrinema* sp. J7-1 的细胞浓度为 2.0, 盐度为 100‰ 时沉淀文石和原白云石 (图 7a), 盐度为 140‰ 时沉淀原白云石和单水合方解石 (图 7b), 盐度为 200‰ 时沉淀原白云石和文石 (图 7c), 盐度为 280‰ 时全为原白云石沉淀 (图 7d), 并且随着盐度增加, 沉淀原白云石增多。更为有趣的是在没有嗜盐古菌参与的情况下, 盐度在 100‰, 140‰, 200‰, 280‰ 时, 均为文石沉淀, 未见原白云石沉淀 (图 7e—h)。硫酸根浓度不影响嗜盐古菌诱导原白云石沉淀 (图 7), 这是碳酸盐岩-膏盐岩沉积体富

SO_4^{2-} 条件下嗜盐古菌仍能诱导原白云石沉淀的重要原因。嗜盐古菌诱导沉淀的原白云石 (图 8) 为低有序度白云石 (<0.4)。

综上所述, 高嗜盐古菌细胞浓度 (>1.5)、高盐度 ($>100\%$) 是诱导早期原白云石沉淀的两个必要条件, 虽然本实验成矿介质设定的 Mg/Ca 为 10, 但 Mg/Ca 介于 2~10 可能更有利于嗜盐古菌诱导原白云石沉淀^[32]。

2 微生物碳酸盐岩储层成因

现代微生物沉积物特征、现代盐湖沉积物特征研究和微生物有机质早期低温降解生酸模拟实验、微生物有机质晚期热解生酸模拟实验、微生物诱导原白云石沉淀模拟实验揭示微生物碳酸盐岩储层成因有其特

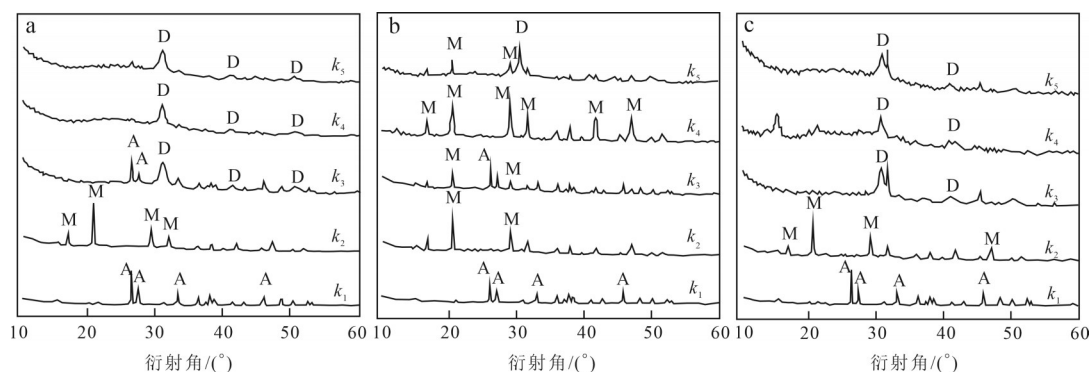


图6 不同细胞浓度嗜盐古菌条件下诱导原白云石沉淀实验X射线衍射图谱

Fig. 6 X-ray diffraction patterns of proto-dolomite precipitation mediated by halophilic archaeal under different cell concentrations

a. 在盐度 200‰ 和嗜盐古菌 J7-1 细胞浓度 (OD_{600}) >1.5 时出现原白云石沉淀; b. 在盐度 200‰ 和嗜盐古菌 J7-3 细胞浓度 (OD_{600}) >2.5 时出现原白云石沉淀; c. 在盐度 200‰ 和嗜盐古菌 LJ7 细胞浓度 (OD_{600}) >1.5 时出现原白云石沉淀

A. 文石; D. 白云石; M. 单水合方解石

[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 分别代表嗜盐古菌细胞浓度 (单位是吸光度) 为 0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 的实验结果。]

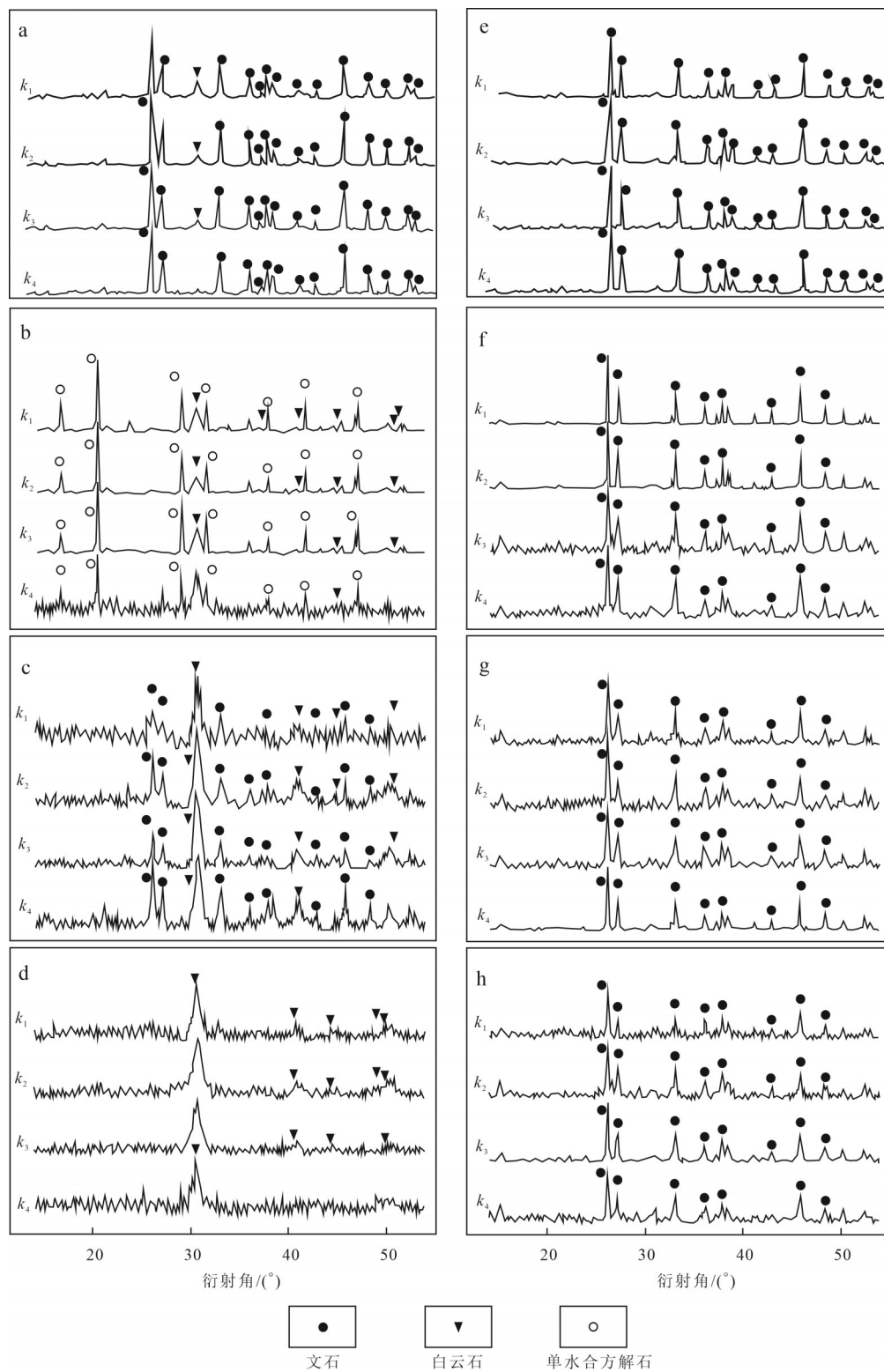


图7 不同盐度、不同硫酸根浓度下原白云石沉淀后X射线衍射图谱

Fig. 7 X-ray diffraction patterns of proto-dolomite precipitation at different salinities and sulfate concentrations

a. 嗜盐古菌 J7-1 细胞浓度 (OD_{600}) 为 2.0, 盐度为 100 ‰ 时出现原白云石沉淀; b. 嗜盐古菌 J7-1 细胞浓度 (OD_{600}) 为 2.0, 盐度为 140 ‰ 时出现原白云石沉淀; c. 嗜盐古菌 J7-1 细胞浓度 (OD_{600}) 为 2.0, 盐度为 200 ‰ 时出现原白云石沉淀; d. 嗜盐古菌 J7-1 细胞浓度 (OD_{600}) 为 2.0, 盐度为 280 ‰ 时出现原白云石沉淀; e. 在没有嗜盐古菌参与的情况下, 盐度为 100 ‰ 时没有原白云石沉淀; f. 在没有嗜盐古菌参与的情况下, 盐度为 140 ‰ 时没有原白云石沉淀; g. 在没有嗜盐古菌参与的情况下, 盐度为 200 ‰ 时没有原白云石沉淀; h. 在没有嗜盐古菌参与的情况下, 盐度为 280 ‰ 时没有原白云石沉淀

(k_1, k_2, k_3, k_4 分别代表 SO_4^{2-} 浓度为 0, 1.0, 29.8, 100.0 mM 的实验结果。)

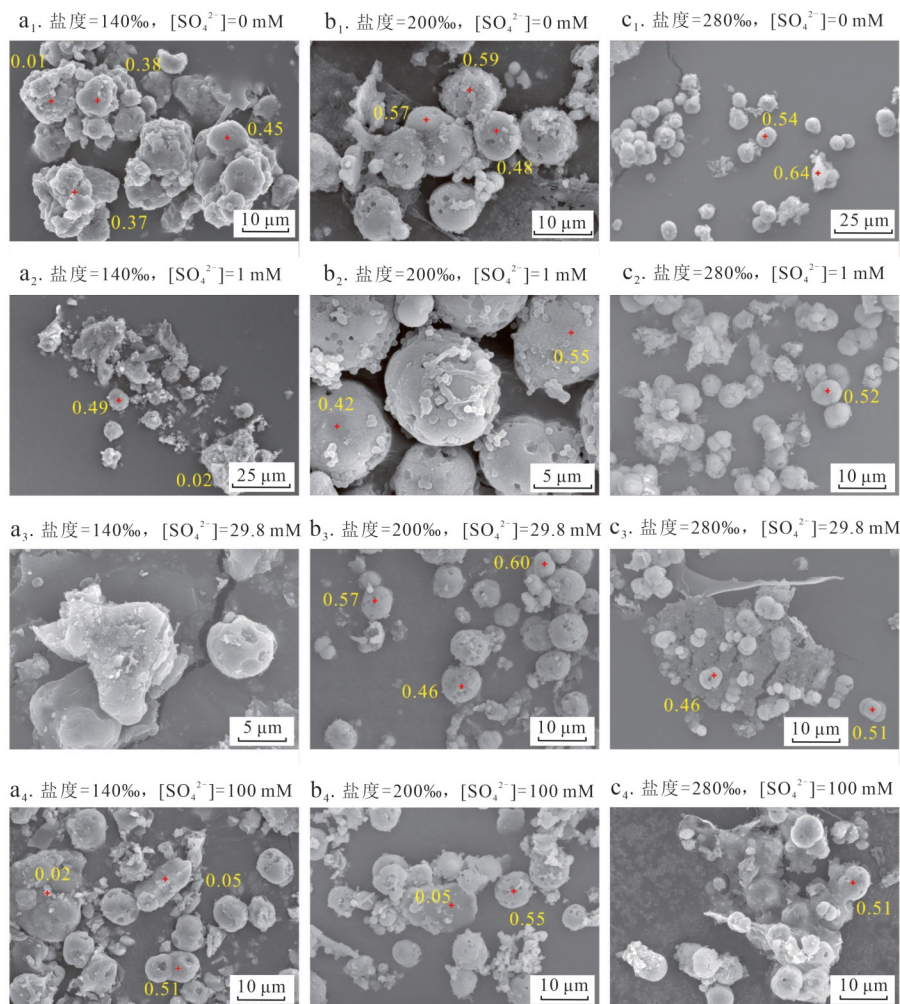


图8 嗜盐古菌诱导沉淀的原白云石特征(图中数据代表白云石有序度)

Fig. 8 Images showing the characteristics of proto-dolomite deposited under mediation of halophilic archaea (the order degree of dolomite is represented with decimal digits)

a_1 — a_4 . 嗜盐古菌 J7-1 细胞浓度(OD_{600})>1.5 时, 随盐度和 SO_4^{2-} 浓度变化的原白云石特征; b_1 — b_4 . 嗜盐古菌 J7-3 细胞浓度(OD_{600})>2.0 时, 随盐度和 SO_4^{2-} 浓度变化的原白云石特征; c_1 — c_4 . 嗜盐古菌 J7 细胞浓度(OD_{600})>1.5 时, 随盐度和 SO_4^{2-} 浓度变化的原白云石特征

殊性,这是由其高初始孔隙度、富微生物有机质和易于发生早期白云石化的特性所决定的,提出了“三因素”控储地质认识。

2.1 叠层石和凝块石沉积是微生物碳酸盐岩储层发育的物质基础

前已述及,微生物碳酸盐岩包括叠层石、凝块石、树枝石、均一石、核形石和纹理石6类^[9]。中国中生代微生物碳酸盐岩储层主要发育于陆相湖盆中,如中国东部诸盆地及柴达木盆地、塔里木盆地古近系微生物碳酸盐岩储层^[33-37]既有叠层石和凝块石灰岩,也有叠层石和凝块石白云岩,手标本呈蜂窝状,储层物性极佳,叠层石和凝块石白云岩储层主要分布于碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系,白云石化对储层的发育似乎没有实质性的影响。中国前寒武纪及古生代海相微生物碳酸盐岩

储层以叠层石和凝块石白云岩为主,主要分布于碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系,如四川盆地灯影组、嘉陵江组、雷口坡组1—3段和塔里木盆地寒武系盐下叠层石和凝块石白云岩储层,未发生白云石化的叠层石和凝块石灰岩往往致密无孔,如四川盆地雷口坡组四段^[17]白云石化对储层的发育似乎具有重要的控制作用。

无论是叠层石和凝块石灰岩储层,还是叠层石和凝块石白云岩储层,储集空间以原生藻格架孔为主,白云石化对孔隙的新增没有实质性的贡献^[38]。巴哈马台地现代微生物沉积物特征研究也揭示,叠层石灰岩具有很大的初始孔隙度,这些孔隙一部分为沉积原生孔,一部分为微生物有机质腐烂形成的孔隙,这些孔隙不但构成了中国中、新生代湖相叠层石、凝块石灰岩和叠层石、凝块石白云岩储层的主要储集空间,前寒武纪及古生代海相叠层石、凝块石白云岩储层的储集空间

同样是对初始孔隙的继承和调整,初始孔隙发育的叠层石和凝块石沉积是储层发育的物质基础。对于中国古老海相叠层石和凝块石白云岩储层而言,这些初始孔隙是如何在经历漫长埋藏地质过程中得以保存的,这是后文要讨论的微生物碳酸盐岩储层成因的另外两个控制因素。

2.2 微生物有机质降解和热解生酸有利于初始孔隙保存

巴哈马台地现代微生物沉积物特征研究不但揭示了叠层石灰岩具有很高的初始孔隙度,而且富含微生物有机质,这些微生物有机质的腐烂不但可以释放大量的初始孔隙,其早期低温降解和晚期热解生成的有机酸有利于初始孔隙在经历漫长埋藏地质过程中的保存,这是微生物碳酸盐岩储层发育的第二个主控因素。

微生物有机质降解和热解生酸模拟实验揭示,由于叠层石和凝块石沉积的微生物有机质最丰富,降解和热解的生酸量大,使得叠层石和凝块石碳酸盐岩在经历漫长的埋藏地质过程中始终处于酸性环境,除有机酸溶蚀成孔外,更有利于初始孔隙的保存,这也是叠层石和凝块石碳酸盐岩储层孔隙中很少有亮晶方解石或白云石胶结物,优质储层呈蜂窝状并保持原岩沉积组构的原因。而且,即使储集空间有被方解石或白云石充填的现象(如四川盆地灯影组葡萄花边状白云石胶结物),这些胶结物应该是生酸前或生酸后的产物,而不是生酸期间的产物。对四川盆地灯影组葡萄花边状白云石胶结物开展激光U-Pb同位素测年,揭示充填孔洞周缘的胶结物形成于准同生期(生酸前),充填孔洞中央或裂缝的胶结物形成于晚燕山期—喜马拉雅期(生酸后)^[39]是埋藏—热液活动的产物。

同时,碳酸盐岩—膏盐岩体系因石膏的沉淀导致 SO_4^{2-} 浓度降低,有利于硝酸盐还原生酸和Fe氧化物还原生酸作用的发生,生酸强度明显提高,更有利于初始孔隙的保存。埋藏环境石膏的溶解产生的 SO_4^{2-} 有利于硫酸盐热化学还原反应(TSR)和溶蚀孔洞的发育。

2.3 优质储层发育于叠层石和凝块石白云岩中

现代盐湖沉积物特征研究及微生物诱导原白云石沉淀模拟实验揭示碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系易于发育沉淀和交代两类早期低温白云岩。虽然白云石化对储集空间的新增没有实质性的贡献,白云岩储层中的孔隙是对原岩孔隙的继承和调整^[40],但早期白云石化导致微生物白云岩在埋藏环境下经历的成岩改造与灰岩完全不同,有利于初始孔隙的保存^[41-42]表现在4个

方面。①早期白云石化导致早期固结(巴哈马台地现代微生物碳酸盐沉积已发生固结或半固结)和密度加大(大于灰岩),白云岩的抗压实能力要大于灰岩,这是微生物白云岩能保留更多沉积原生孔的原因之一;②微生物白云岩的抗压溶能力远大于灰岩,在灰岩中常见的压溶缝合线在白云岩中几乎见不到,压溶的产物往往为邻近孔隙的方解石胶结物提供了物源,这是埋藏环境下微生物白云岩先存孔隙得到更多保留的重要原因;③深埋环境白云岩比灰岩更容易被有机酸溶解形成次生溶孔^[43-45];④白云岩比灰岩具有更大的脆性,易于发生机械破碎裂缝和砾间孔。

综上所述,碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系叠层石和凝块石碳酸盐岩初始孔隙度高、富微生物有机质含量、微生物有机质早期降解和晚期热解生酸,且易于发生早期白云石化,导致叠层石和凝块石碳酸盐岩储层成因有别于其他类型的碳酸盐岩和其他类型的微生物碳酸盐岩,储层发育潜力更大,以叠层石和凝块石白云岩储层为主。

3 微生物碳酸盐岩储层分布

“三因素”控储地质认识揭示微生物碳酸盐岩储层主要发育于碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系的叠层石和凝块石沉积相带,岩性主要为叠层石和凝块石白云岩。

3.1 微生物碳酸盐岩储层主要分布于叠层石和凝块石沉积相带

虽然前人^[2,9,46]对微生物碳酸盐岩的研究集中在岩石特征和分类上,对微生物碳酸盐岩岩石类型及组合的环境意义、岩相古地理及沉积模式的认识还不够深入,但胡安平(2021)^[47]通过5条剖面微生物碳酸盐岩岩石特征及组合序列研究,建立了缓坡沉积体系和镶边沉积体系两个沉积模式(图9),为叠层石和凝块石碳酸盐岩有利相带分布提供了依据。

从缓坡沉积体系微生物碳酸盐沉积模式可知,叠层石碳酸盐岩主要分布在正常浪基面与平均低潮线之间的内缓坡相带,凝块石碳酸盐岩主要分布在风暴浪基面与正常浪基面之间的中缓坡相带,凝块石沉积水体的深度大于叠层石^[48],以四川盆地震旦系叠层石和凝块石白云岩储层为代表。从镶边沉积体系微生物碳酸盐沉积模式可知,叠层石碳酸盐岩主要分布在正常浪基面与平均低潮线之间的碳酸盐台地(潟湖),凝块石碳酸盐岩主要分布在风暴浪基面与正常浪基面之间的台缘前斜坡,以塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组、四

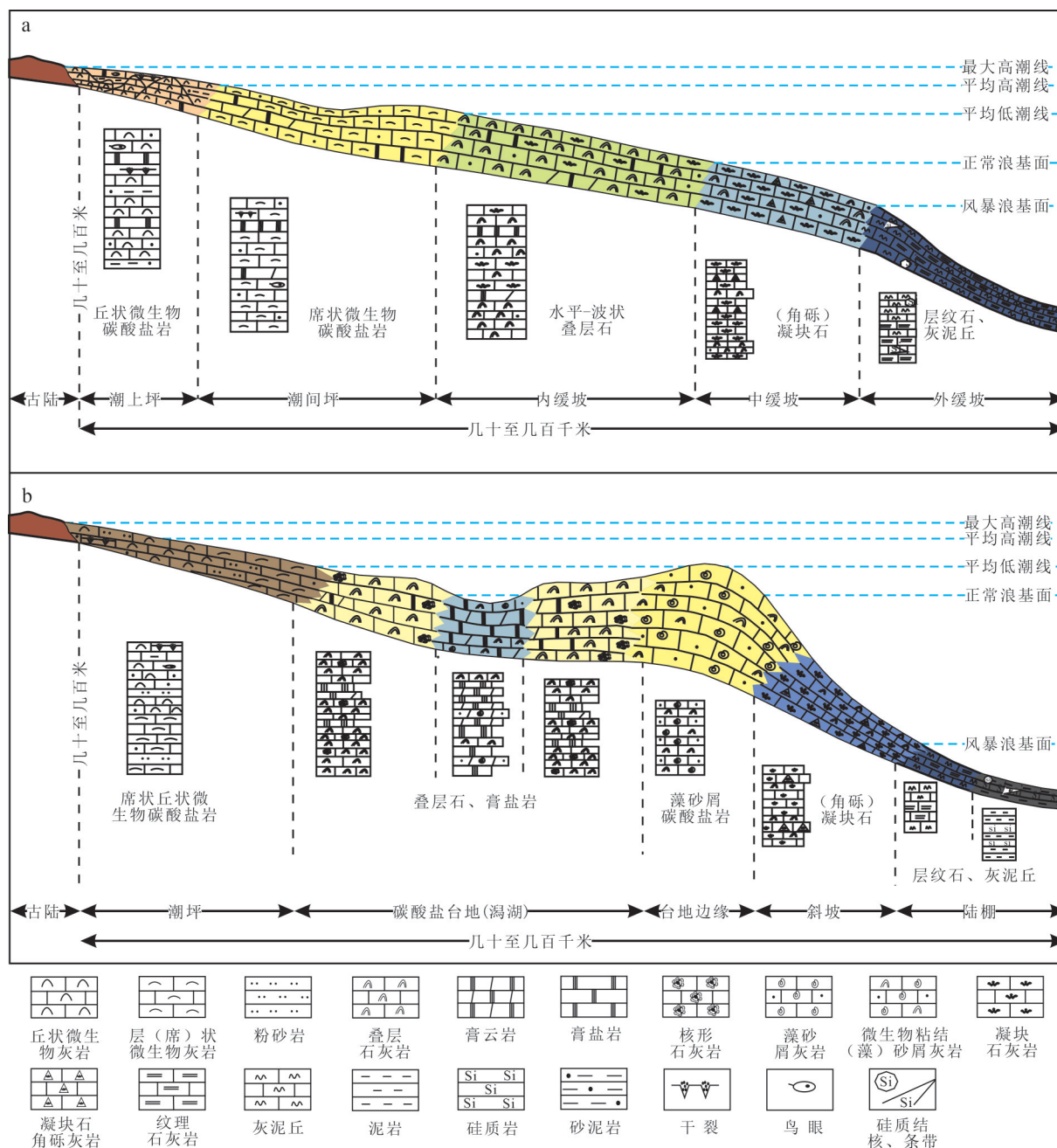


图9 微生物碳酸盐岩沉积模式

Fig. 9 Sedimentary model of microbial carbonates

a. 缓坡沉积; b. 镶边沉积

川盆地雷口坡组叠层石和凝块石白云岩储层为代表。

虽然不同类型的微生物碳酸盐岩可以出现在同一沉积环境,不同沉积环境也可以出现同类型的微生物碳酸盐岩,尺度上甚至一些小的生境或沉积环境出现与大生境或沉积环境相同的沉积特征和模式,但岩石类型、规模和组合序列的环境意义是基本明确的。不同地质历史时期均可能发育缓坡沉积体系和镶边沉积体系微生物碳酸盐沉积,但隐生宙以缓坡沉积体系为主,显生宙以镶边沉积体系为主。

3.2 微生物碳酸盐岩储层主要发育于碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系

碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系盐度高,有利于嗜盐古菌的繁盛和诱导原白云石沉淀,因此微生物白云岩储层主要发育于碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系。

胡安平(2019)^[49]研究认为,碳酸盐岩-膏盐岩沉积体系随气候由潮湿向干旱迁移,由下向上依次发育凝块石白云岩、藻砂屑白云岩、叠层石白云岩、席(丘)

状微生物白云岩、膏云岩、膏盐岩和石盐岩性组合序列,反之亦然,气候突变会导致某种岩性的缺失,这为通过古气候研究,预测碳酸盐岩-膏盐岩组合储层的分布提供了依据。

缓坡沉积体系随气候由潮湿向干旱迁移,由下向上依次发育凝块石白云岩储层和叠层石白云岩储层,气候的多期次旋回可以导致储层在垂向上的多套叠置。以四川盆地南江杨坝剖面震旦系灯影组(图10a)

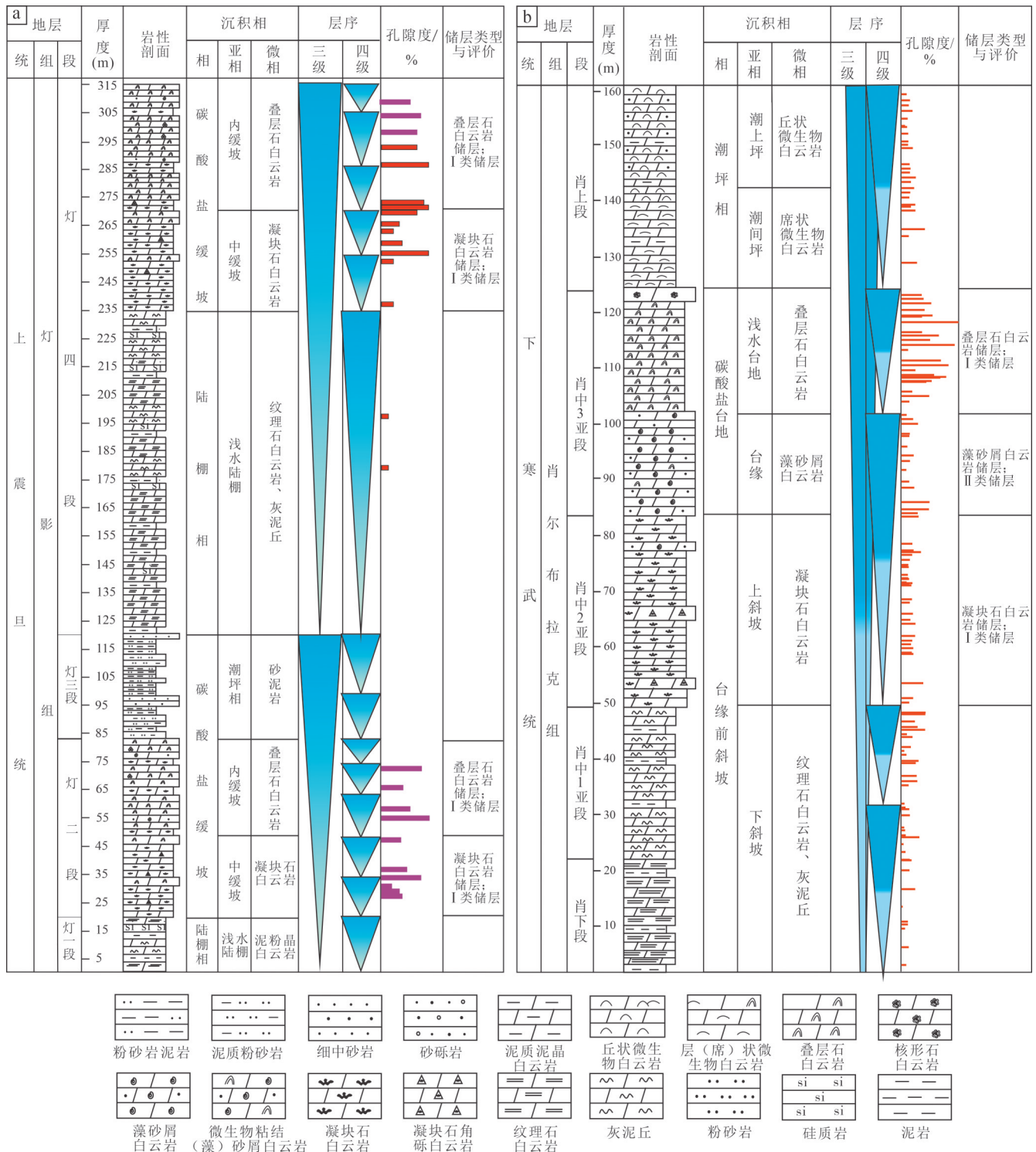


图10 碳酸盐岩-膏盐岩组合微生物白云岩储层类型和分布

Fig. 10 Types and distribution of microbial dolomite reservoirs in carbonate-evaporite system

a. 四川盆地南江杨坝剖面震旦系灯影组叠层石和凝块石白云岩储层;

b. 塔里木盆地什艾日克剖面下寒武统肖布拉克组叠层石、藻砂屑和凝块石白云岩储层

为例,这是由风暴—波浪—潮汐—风暴—波浪作用构成的两个水体逐渐变浅序列,虽未被膏盐岩直接覆盖,但盆地范围内早中寒武世发育多个膏盐湖及多套膏盐岩地层^[50]。灯二段下部发育凝块石白云岩储层,灯二段上部发育叠层石白云岩储层,灯四段上部由下至上同样发育了凝块石白云岩储层—叠层石白云岩储层,构成与古气候旋回吻合的两期储层发育旋回,储层累计厚度大于100 m。

镶边沉积体系由于镶边台缘的存在,新增了一套藻砂屑白云岩储层,随气候由潮湿向干旱迁移,由下向上依次发育凝块石白云岩储层—藻砂屑白云岩储层—叠层石白云岩储层,气候的多期次旋回可以导致储层在垂向上的多套叠置。以塔里木盆地什艾日克剖面下寒武统肖尔布拉克组(图10b)为例,这是由风暴—波浪—潮汐作用构成的水体逐渐变浅序列,虽未被膏盐岩直接覆盖,但盆地范围内下寒武统吾松格尔组膏盐岩广泛发育^[51-52]。肖中2亚段发育凝块石白云岩储层,肖中3亚段下部发育藻砂屑白云岩储层,肖中3亚段上部发育叠层石白云岩储层,储层累计厚度约60 m。

中国海相层系发育3套碳酸盐岩—膏盐岩组合:①灯影组—中、下寒武统,以塔里木和四川盆地为代表;②下奥陶统,以鄂尔多斯盆地为代表;③中、下三叠统,以四川盆地为代表。同时,中国东部诸盆地及柴达木、塔里木古近系也发育碳酸盐岩—膏盐岩组合,规模优质微生物白云岩储层勘探值得期待。

4 结论

1) 与其他类型微生物碳酸盐岩和非微生物碳酸盐岩相比,叠层石和凝块石碳酸盐岩具有更高的初始孔隙度和微生物有机质丰度,为储层发育奠定了物质基础。

2) 微生物有机质早期低温降解和晚期热解生酸使初始孔隙在埋藏环境得以保存和进一步扩溶,这是叠层石和凝块石碳酸盐岩储层发育的关键。

3) 早期白云石化有利于孔隙的保存,碳酸盐岩—膏盐岩体系微生物碳酸盐沉积易于发育早期沉淀和交代两类低温白云石,这是叠层石和凝块石白云岩储层主要发育于碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系中的原因,受古气候和沉积相带控制。

参 考 文 献

[1] Burne R V, Moore L S. Microbialites: Organosedimentary deposits of benthic microbial communities[J]. *Palaos*, 1987, 2: 241-254.

[2] Riding R. Microbial carbonates: The geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms [J]. *Sedimentology*, 2000, 47 (S1): 179-214.

[3] Riding R. Classification of microbial carbonates [M]//Riding. *Calcareous algae and stromatolites*. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 21-51.

[4] Lowe D R. Stromatolites 3400 Myr old from the Archean of Western Australia [J]. *Nature*, 1980, 284: 441-443.

[5] Schidlowski M A. 3 800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks [J]. *Nature*, 1988, 333: 313-318.

[6] Riding R. Microbial carbonate abundance compared with fluctuations in metazoan diversity over geological time [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 185: 229-238.

[7] Kalkowsky E. Oolith und stromatolith im norddeutschen Buntsandstein [J]. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 1908, 60: 68-125.

[8] Riding R. The nature of stromatolites: 3500 Million years of history and a century of research [M]//Reitner J. *Advances in stromatolite geobiology*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 29-74.

[9] 梅冥相. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订: 对灰岩成因结构分类体系的补充 [J]. *地学前缘*, 2007, 14(5): 221-234. Mei Mingxiang. Revised classification of microbial carbonates: Complementing the classification of limestones [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 221-234.

[10] 杨仁超, 樊爱萍, 韩作振, 等. 核形石研究现状与展望 [J]. *地球科学进展*, 2011, 2(5): 465-474. Yang Renchao, Fan Aiping, Han Zuozhen, et al. Status and prospect of studies on oncoid [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26 (5): 465-474.

[11] Shapiro R S. A comment on the systematic confusion of thrombolites [J]. *Palaos*, 2000, 15(2): 166-169.

[12] 戴永定, 刘铁兵, 沈继英. 生物成矿作用和生物矿化作用 [J]. *古生物学报*, 1994, 3(5): 575-594.

[13] Mancini E A, Benson D J, Hart B S, et al. Appleton field case study (eastern Gulf coastal plain): Field development model for Upper Jurassic microbial reef reservoirs associated with paleotopographic basement structures [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(11): 1699-1717.

[14] 杨跃明, 文龙, 罗冰等. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起震旦系天然气成藏特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2): 179-188. Yang Yueming, Wen Long, Luo Bing, et al. Hydrocarbon accumulation of Sinian natural gas reservoirs, Leshan-Longnüsi paleohigh, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 179-188.

[15] 费宝生, 汪建红. 中国海相油气田勘探实例之三: 渤海湾盆地任丘古潜山大油田的发现与勘探 [J]. *海相油气地质*, 2005, 10 (3): 43-50. Fei Baosheng, Wang Jianhong. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 3): Renqiu Buried-hill Oilfield, Bohaiwan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2005, 10(3): 43-50.

[16] 白莹, 罗平, 刘伟, 等. 微生物碳酸盐岩储层特征及主控因素——以塔里木盆地阿克苏地区下寒武统肖尔布拉克组上段

- 为例[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(4): 95-106.
- Bai Ying, Luo Ping, Liu Wei, et al. Characteristics and main controlling factors of microbial carbonate reservoir: A case study of upper member of Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Akesu area, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(4): 95-106.
- [17] 王浩. 四川盆地西部雷口坡组四段微生物碳酸盐岩储层特征及其主控因素[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- Wang Hao. Characteristics and main controlling factors of microbial carbonate reservoir in the Leikoupo formation in Western Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [18] 宋金民, 刘树根, 李智武, 等. 四川盆地上震旦统灯影组微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 741-752.
- Song Jinmin, Liu Shugen, Li Zhiwu, et al. Characteristics and controlling factors of microbial carbonate reservoirs in the Upper Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin, China[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 741-752.
- [19] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 545-554.
- Shen Anjiang, Zhao Wenzhi, Hu Anping, et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 545-554.
- [20] 白莹, 罗平, 刘伟, 等. 微生物碳酸盐岩储层特征及主控因素——以塔里木盆地阿克苏地区下寒武统肖尔布拉克组上段为例[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(4): 95-106.
- Bai Ying, Luo Ping, Liu Wei, et al. Characteristics and main controlling factors of microbial carbonate reservoir: A case study of upper member of Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Akesu area, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(4): 95-106.
- [21] 李朋威, 罗平, 宋金民, 等. 微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素——以塔里木盆地西北缘上震旦统一下寒武统为例[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1074-1089.
- Li Pengwei, Luo Ping, Song Jinmin, et al. Characteristics and main controlling factors of microbial carbonate reservoirs: A case study of Upper Sinian-Lower Cambrian in the north western margin of Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1074-1089.
- [22] Zhu D, Liu Q, He Z, et al. Early development and late preservation of porosity linked to presence of hydrocarbons in Precambrian microbialite gas reservoirs within the Sichuan Basin, southern China[J]. Precambrian Research, 2020, 342: 105694.
- [23] Enos P. Surface sediment facies map of the Florida-Bahamas Plateau. Map series MC-5, Boulder, CO. GSA, 1974, 4.
- [24] 王月, 沈建伟, 杨红强, 等. 微生物碳酸盐沉积及其研究意义[J]. 地球科学进展, 2011, 26(10): 1038-1049.
- Wang Yue, Shen Jianwei, Yang Hongqiang, et al. Microbial carbonates and its research significance[J]. Advances in Earth Sciences, 2011, 26(10): 1038-1049.
- [25] 韩作振, 陈吉涛, 迟乃杰, 等. 微生物碳酸盐岩研究: 回顾与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4): 29-38.
- Han zuozhen, Chen Jitao, Chi Naijie, et al. Microbial Carbonates: A review and perspectives[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(4): 29-38.
- [26] 吴亚生, 姜红霞, 李莹, 等. 微生物碳酸盐岩的显微结构基本特征[J]. 古地理学报, 2021, 23(2): 321-334.
- Wu Yasheng, Jiang Hongxia, Li Ying, et al. Microfabric Characteristics of Microbial Carbonates[J]. Journal of Palaeogeography, 2021, 23(2): 321-334.
- [27] 郝雁, 张峭楠, 张德民. 微生物碳酸盐岩研究现状及进展[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(4): 415-427.
- Hao Yan, Zhang Shaonan, Zhang Demin, et al. Current research progress of microbial carbonates[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 45(4): 415-427.
- [28] Land L S. Failure to precipitate dolomite at 25 °C from dilute solution despite 1 000-fold oversaturation after 32 years[J]. Aquatic Geochemistry, 1988, 4(3): 361-368.
- [29] Vasconcelos C, McKenzie J A, Bernasconi S, et al. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures[J]. Nature, 1995, 377(6546): 220-222.
- [30] Warthmann R, Vasconcelos C, Sass H, et al. Desulfovibrio brasiliensis sp. nov., a moderate halophilic sulfate-reducing bacterium from Lagoa Vermelha (Brazil) mediating dolomite formation[J]. Extremophiles, 2005, 9(3): 255-261.
- [31] Kenward P A, Fowle D A, Goldstein R H, et al. Ordered low-temperature dolomite mediated by carboxyl-group density of microbial cell walls[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(11): 2113-2125.
- [32] Xuan Qiu, Yancheng Yao, Hongmei Wang, et al. Halophilic Archaea mediate the formation of proto-dolomite in solutions with various sulfate concentrations and salinities[J]. Frontiers in microbiology, 2019, 10(480): 1-10.
- [33] 张长好, 郭召杰, 崔俊等. 柴达木盆地南翼山浅层油藏岩石类型及沉积模式[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(5): 903-908.
- Zhang Changhao, Guo Zhaojie, Cui Jun, et al. Lithotype and sedimentation model of nanyishan shallow oil pools[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(5): 903-908.
- [34] 张振城, 孙建孟, 马建海, 等. 花土沟油田下油砂山组—上干柴沟组藻灰岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(6): 703-706+712.
- Zhang Zhencheng, Sun Jianmeng, Ma Jianhai, et al. Characteristics of algal limestone reservoirs in Xiayoushashan-Shangganchaigou Formations in Huatugou oilfield, western Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(6): 703-706+712.
- [35] 徐斐, 陆廷清, 马青. 塔西南山前古近系沉积相分析与研究[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(12): 195-196.
- Xu Fei, Lu tingqing, Ma Qing. Analysis and study on sedimentary facies of piedmont Paleogene in Southwest Tarim Basin[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, 46(12): 195-196.
- [36] 林春明, 王兵杰, 张霞等. 渤海湾盆地北塘凹陷古近系湖相白云岩地质特征及古环境意义[J]. 高校地质学报, 2019, 25(3): 377-388.
- Lin Chunming, Wang Bingjie, Zhang Xia, et al. Geological characteristics and paleoenvironmental significance of the paleogene la-

- custrine dolomite in the Beitang Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2019, 25(3): 377-388.
- [37] 张永胜. 歧口凹陷古近系沙一段沉积环境及白云岩成因机理分析[D]. 吉林: 吉林大学, 2017.
- Zhang Yongsheng. The Sedimentary environment of the First Member of the Paleogene Shahejie Formation in the Qikou Sag and its dolomite genesis[D]. Jilin: Jilin University, 2017.
- [38] 陈娅娜, 沈安江, 潘立银等. 微生物白云岩储集层特征、成因和分布—以四川盆地震旦系灯影组四段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(5): 704-715.
- Chen Yana, Shen Anjiang, Pan Liyin, et al. Features, origin and distribution of microbial dolomite reservoirs: A case study of 4th Member of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(5): 704-715.
- [39] 沈安江, 胡安平, 程婷, 等. 激光原位 U-Pb 同位素定年技术及其在碳酸盐岩成岩-孔隙演化中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(6): 1062-1074.
- Shen Anjiang, Hu Anping, Cheng Ting, et al. Laser ablation in situ U-Pb dating and its application to diagenesis-porosity evolution of carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(6): 1062-1074.
- [40] 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 白云岩成因类型、识别特征及储集空间成因[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 923-935.
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, et al. Genetic types and distinguished characteristics of dolomite and the origin of dolomite reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 923-935.
- [41] 李开开, 张学丰, 贺训云等. 川东北飞仙关组白云岩化作用对鲕粒滩储层的孔隙改造效应[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 706-718.
- Li Kaikai, Zhang Xuefeng, He Xunyun, et al. Modification of dolomitization on pores in oolitic shoal reservoirs of the Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 706-718.
- [42] 熊鹰. 蒸发环境中孔洞型薄储层的形成与保存[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- Xiong Ying. Formation and preservation of vuggy thin carbonate reservoirs in the evaporitic environment[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [43] 郑剑锋, 沈安江, 黄理力等. 基于埋藏溶蚀模拟实验的白云岩储层孔隙效应研究—以塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组为例[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(5): 716-723.
- Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Huang Lili, et al. Pore effect of dolomite reservoirs based on burial dissolution simulation: A case study of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in the Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2017, 39(5): 716-723.
- [44] 贾连奇, 蔡春芳, 李红霞等. 塔中地区热化学硫酸盐还原作用对深埋白云岩储层的改造[J]. *沉积学报*, 2016, 34(6): 1057-1067.
- Jia Lianqi, Cai Chunfang, Li Hongxia, et al. Thermochemical sulfate reduction-related mesogenetic dissolution of deeply buried dolostone reservoirs in the Tazhong Area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(6): 1057-1067.
- [45] 余敏, 寿建峰, 沈安江等. 埋藏有机酸性流体对白云岩储层溶蚀作用的模拟实验[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(3): 10-17.
- She Min, Shou Jianfeng, Shen Anjiang, et al. Experimental simulation of dissolution and alteration of buried organic acid fluid on dolomite reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(3): 10-17.
- [46] Shapiro R S. A comment on the systematic confusion of thrombolites[J]. *Palaios*, 2000, 15: 166-169.
- [47] 胡安平, 沈安江, 郑剑锋. 微生物碳酸盐岩分类、沉积环境与沉积模式[J]. *海相油气地质*, 2021, 26(1): 1-15.
- Hu Anping, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, et al. The classification, facies and sedimentary models of microbialites [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2021, 26(1): 1-15.
- [48] 由雪莲, 孙枢, 朱井泉等. 微生物白云岩模式研究进展[J]. *地学前缘*, 2011, 18(4): 52-64.
- You Xuelian, Sun Shu, Zhu Jingquan, et al. Progress in the study of microbial dolomite model, *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(4): 52-64.
- [49] 胡安平, 沈安江, 杨翰轩等. 碳酸盐岩-膏盐岩共生体系白云岩成因及储盖组合[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(5): 916-928.
- Hu Anping, Shen Anjiang, Yang Hanxuan, et al. Dolomite genesis and reservoir-cap rock assemblage in carbonate-evaporite paragenesis system[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(5): 916-928.
- [50] 顾志翔, 何幼斌, 彭勇民等. 四川盆地寒武统膏盐岩“多潟湖”沉积模式[J]. *沉积学报*, 2019, 37(4): 834-846.
- Gu Zhixiang, He Youbin, Peng Yongmin, et al. “Multiple-lagoon” sedimentary model of the Lower Cambrian gypsum-salt rocks in the Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(4): 834-846.
- [51] 张天付, 黄理力, 倪新锋. 塔里木盆地柯坪地区下寒武统吾松格组岩性组合及其成因和勘探意义——亚洲第一深井轮探1井突破的启示[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 928-940.
- Zhang Tianfu, Huang Lili, Ni Xinfeng, et al. Lithological combination, genesis and exploration significance of the Lower Cambrian Wusonggeer Formation of Kalpin area in Tarim Basin: Insight through the deepest Asian onshore well—Well Luntan 1 [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 928-940.
- [52] 姜海健, 储呈林, 杨鑫等. 塔里木盆地西南地区早中寒武世岩相古地理[J]. *海相油气地质*, 2017, 22(1): 32-38.
- Jiang Haijian, Chu Chenglin, Yang Xin, et al. Lithofacies paleogeography of Early-Middle Cambrian in Southwestern Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2017, 22(1): 32-38.

(编辑 张亚雄)