

## 微生物白云石模式评述

杨华<sup>1</sup>, 王宝清<sup>2</sup>

(1 中国石油长庆油田分公司; 2 西安石油大学油气资源学院)

**摘要** Vasconcelos 等在实验室模拟巴西 Lagoa Vermelha 潟湖条件, 成功地沉淀出白云石, 由此提出了微生物白云石模式。该模式在南澳大利亚、阿拉伯海湾、西印度外陆棚边缘以及意大利南部等地区得到了不同研究者的肯定, 我国鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段白云岩也可以解释为微生物成因。此模式对白云石形成机理的研究具有突破性的意义。当硫酸盐还原细菌利用  $\text{SO}_4^{2-}$  时, 也吸收了  $\text{Mg}^{2+}$ , 因为  $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  形成了很强的离子对。微生物由于其新陈代谢作用利用  $\text{SO}_4^{2-}$  而克服了动力障碍, 同时从离子对中释放出  $\text{Mg}^{2+}$ 。在白云石形成的化学反应中, 微生物因素把硫酸根离子从反应的抑制剂变成了催化剂。白云石一旦成核, 就会在埋藏过程中长大。尽管不是所有的白云石都可以用微生物白云石模式来解释, 但野外研究和模拟实验都证明这一模式是有说服力和生命力的。

**关键词** 白云石化作用; 白云岩; 成岩机理; 微生物作用; 成因模式; 巴西; 鄂尔多斯盆地

**中图分类号**: TE111.3; P57 **文献标识码**: A

白云岩储层大约占北美碳酸盐岩油气储层的 80%<sup>[1]</sup>, 俄罗斯、西北欧、南欧、北非、西非、中东及远东地区都有大量的白云岩储层<sup>[2]</sup>, 中国的碳酸盐岩储层与白云岩也有不同程度的关系。白云石是组成白云岩的主要矿物, 因而白云石的形成机理一直是沉积学家和石油地质学家关注的重要问题。

自 1791 年 Dolomieu 发现白云石以来<sup>[3]</sup>, 已有 200 多年, 前两个世纪的研究历史为: 第一个世纪, 主要是发现阶段, 并应用物理化学原理来解释所观察到的现象; 第二个世纪是在现代沉积中发现了白云石, 并发展了新思想。这些新思想主要表现在三个方面: 一是根据现代沉积中的白云石形成条件, 解释白云石的形成机理; 二是设法模拟自然条件, 在实验室沉淀白云石; 三是提出了一系列模式。当前有一些长期存在的问题仍然没有解决, 其中之一是在复制现代白云石形成环境和条件的实验室无法沉淀出白云石<sup>[4]</sup>。

上世纪末, Vasconcelos 等<sup>[5-6]</sup>根据巴西 Lagoa Vermelha 海岸潟湖现代白云石的研究, 在实验室模拟 Lagoa Vermelha 潟湖条件<sup>[7-9]</sup>, 成功地沉淀出白云石,

并由此提出了微生物白云石模式, 即由微生物作为催化剂促使白云石沉淀的模式。

### 1 微生物白云石模式的由来

自 20 世纪 60 年代在现代沉积中发现白云石以来, 在研究白云石形成机理的过程中, 提出过许多白云石化模式, 如渗滤回流模式<sup>[10-11]</sup>、萨勃哈或蒸发泵模式<sup>[12]</sup>、混合水模式<sup>[13-14]</sup>、构造控制的热液白云石化模式<sup>[15]</sup>等。由于这些模式没有用实验证实, 往往在一种模式流行一段时间后, 被新的模式所取代。白云石形成机理问题至今仍然没有真正得以解决。

在地表温度的实验室条件下或现代自然环境下很难从饱和溶液中沉淀出白云石, 很多企图合成白云石的非生物实验均以失败告终<sup>[16-17]</sup>。此障碍与动力因素有关<sup>[18-20]</sup>。沉淀实验的失败是没有考虑矿化过程中生命活动的影响。微生物参与白云石形成的假说并不是新近提出的<sup>[21]</sup>, 过去十多年对这一观点积极肯定的评价不断增加。白云石的形成可出现在适合微生物生长, 有足够  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  离子的地

收稿日期: 2012-03-06

基金项目: 本文受“十一五”国家重大专项“四川、塔里木、鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩形成机理与有利储层分布预测”(编号: 2008ZX05004-002)资助

杨华: 1963 年生, 博士, 教授级高工。1985 年西南石油学院本科毕业, 2004 年获成都理工大学博士学位, 主要从事石油地质研究。通讯地址: 710018 西安市未央路 151 号

质条件下,可以从沉积表面一直到地下 1~3 km 的深处。许多学者认为,微生物可以把  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  集中在其细胞表面,产生一个微环境,在此微环境中方解石或白云石的离子活度积可以超过饱和度,因而有利于碳酸盐在微生物体周围沉淀<sup>[22-24]</sup>。他们注意到,镁离子可能优先留在有机质基质上,这些富  $\text{Mg}^{2+}$  的点可以成为白云石的核和重结晶的中心。硫酸盐还原微生物是碳酸盐沉淀中最常涉及的一类。

1995 年, Vasconcelos 等<sup>[5]</sup>提出了微生物白云石模式,十多年来,通过 Vasconcelos 等和其他学者的进一步工作,表明此模式对白云石形成机理的研究具有突破性的意义。

## 2 微生物白云石的现代沉积证据

微生物白云石形成机理的现代沉积证据建立在巴西 Lagoa Vermelha 海岸潟湖沉积的详细研究基础上<sup>[5-6]</sup>。

Lagoa Vermelha(图 1)是巴西里约热内卢以东 90km 大西洋沿岸一系列小的、孤立的海岸潟湖之一,具有非同寻常的水文和气候背景。潟湖水浅,最深 1.7 m,面积约 2.4 km<sup>2</sup>,潟湖之外发育一片很好的藻席。该地区以半干燥的微气候为绝对优势,导致了在旱季时潟湖极高的盐度。强烈的蒸发提高了盐度,降低了潟湖水面,使得海水流入,提供了微生物作用的离子。在潮湿季节降雨量超过蒸发量,引起盐度强烈下降,有时可达到半咸水状态。短期内超咸水和半咸水之间的变化反映在 Lagoa Vermelha 潟湖沉积物中不同的碳酸盐矿物上。一个宽约 400 m 的障壁砂丘把潟湖与大西洋分隔,并作为海水补给的通道。淡水的补给则通过大陆一侧的更新世砂丘。了解 Lagoa Vermelha 潟湖的年水文特征是重要的,因为它提供了用来形成白云石的离子来源和浓度以及白云石沉淀时间的信息。白云石明显沉淀于超咸水条件下,高镁方解石形成于中等盐度条件下,而低镁方解石则形成于半咸水条件下<sup>[6]</sup>。

图 1 说明了从 Lagoa Vermelha 潟湖观察到的微生物白云石模式。潟湖较高的有机质生产率使得沉积物—水界面为厌氧条件,并形成富碳有机质的黑色淤泥。微生物活动明显促使了软泥层中碳酸盐矿物的沉淀。在这种环境中形成的现代白云石的产状,说明了微生物活动可能影响了白云石的成核。潟湖中微生物的活动可能直接受水化学变化的影响。在

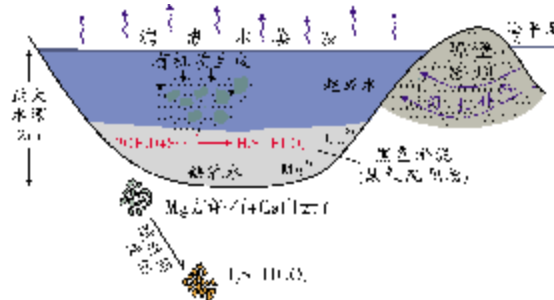


图 1 巴西 Lagoa Vermelha 潟湖微生物白云石形成机理图示(据文献[6,25]整理)

在旱季,蒸发作用降低了潟湖水面,水位下降,使海水能通过障壁砂坝渗透进入潟湖。潟湖高的有机质生产率导致沉积物—水界面缺氧,在潟湖底部形成了富有机质的黑色淤泥。高盐度水提高了硫酸盐含量,这样就提供了微生物硫酸盐还原的硫的来源,提高了镁的含量,呈  $\text{Mg}$  方解石和  $\text{Ca}$  白云石沉淀。淤泥中的微生物活动是原始碳酸盐沉淀的媒介,之后碳酸盐由于埋藏而成熟。最后,微生物活动终止,但是白云石的形成作用并不因此而停止,而是会在由微生物活动产生晶核的晶体基底之上继续沉淀白云石<sup>[6,26]</sup>。潟湖底部的黑色淤泥含大量有机质,同时由于盐度高,含石膏等硫酸盐矿物,有机质与硫酸盐矿物反应生成硫化氢和重碳酸盐,介质呈强还原条件。进入潟湖的海水含大量  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  离子,与  $\text{HCO}_3^-$  结合形成  $\text{Mg}$  方解石和  $\text{Ca}$  白云石。当硫酸盐还原细菌利用和消耗  $\text{SO}_4^{2-}$  离子时,同时也利用和消耗了细胞中与  $\text{SO}_4^{2-}$  离子伴生的  $\text{Mg}^{2+}$  离子,故而随时间的变化会释放出  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{HCO}_3^-$ 。由于结晶速度过快,无法形成晶体结构很有序的白云石,只能在成岩作用过程中逐步转变为有序的白云石。

Lagoa Vermelha 潟湖,盐度变化对微生物数量的影响可能表现为水—软泥界面的不同的新陈代谢作用。在极高的盐度条件下,硫酸盐还原生物可能变得更活跃。

Lagoa Vermelha 潟湖最上部 1 m 的沉积物以碳酸盐与富有机碳层互层为特征。低  $\text{Mg}$  方解石、文石、高  $\text{Mg}$  方解石 (7~35 mol %  $\text{MgCO}_3$ )、 $\text{Ca}$  白云石 (42~48 mol %  $\text{MgCO}_3$ ) 是出现在潟湖中的碳酸盐矿物相<sup>[6,26]</sup>。

在 Lagoa Vermelha 潟湖白云石沉淀的条件下,  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  似乎是最基本的成分。当硫酸盐还原细菌利用  $\text{SO}_4^{2-}$  时,也吸收了  $\text{Mg}^{2+}$ , 因为  $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  形成了很强的离子对。换言之,微生物由于其新陈代谢作用利用  $\text{SO}_4^{2-}$  而克服了动力障碍,同时从离子对中释放出  $\text{Mg}^{2+}$ 。在小于微米级的范围内微生物新陈代谢作用使得  $\text{HCO}_3^-$  在细胞周围的微环境饱和,产生了有利于白云石沉淀的条件。微生物成核晶体后来

被埋藏在原始形成的Ca白云石经历成熟作用(aging process)的地方,因此无机的重结晶作用出现了,形成了更理想配比的白云石(图1)。微生物白云石模式认为不断地供应 $\text{SO}_4^{2-}$ 对保持产生白云石的微生物活动是必须的。在白云石形成的化学反应中,微生物因素把硫酸根离子从反应的抑制剂变成了催化剂。白云石一旦成核,就会在埋藏过程中长大。在没有一定量细菌活动的纯无机系统中,硫酸盐仍然可能是白云石沉淀的抑制剂,因此,适量的细菌成了毫无疑问的关键。事实表明,白云石没有发现沉淀在大多数缺氧的、富碳和富有机质的海相沉积物中。同样,在没有细菌活动的、贫有机质无机系统中,硫酸根离子可能仍然是阻止白云石沉淀的因素<sup>[27-28]</sup>。

Vasconcelos认为硫酸盐还原细菌改善了白云石沉淀发生的基本条件。 $\text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Mg}^{2+}$ 形成了强离子对。这些离子对就象单个颗粒一样在空间上连结在一起。另外,当 $\text{SO}_4^{2-}$ 离子为硫酸盐还原细菌利用时,细菌同时利用了细胞中与其伴生的 $\text{Mg}^{2+}$ 离子。 $\text{Mg}$ 对于细胞中许多生命生理作用是基本的组分,它占了干体重量的0.5%。同样, $\text{Mg}$ 是许多酶物质的无机因素,它是叶绿素分子的中心部分。尽管 $\text{Mg}$ 的生理意义很重要,但过量的 $\text{Mg}$ 会与其它硫酸盐还原副产物如重碳酸根离子和硫化氢一起释放。在细胞体周围微环境中微米级的 $\text{Mg}$ 饱和可能产生有利于白云石沉淀的条件,如在细菌培养实验中观察到的那样<sup>[5-6]</sup>。

硫酸盐还原细菌需要克服具有高有序晶体结构矿物形成的动力学障碍。硫酸盐还原细菌通过改变微环境,提供让白云石小晶体可以形成晶核的表面来实现克服这个动力学障碍。细菌需要 $\text{SO}_4^{2-}$ 离子实现新陈代谢,白云石的沉淀需要高的过量的 $\text{Mg}^{2+}$ 浓度和高的碱度。

### 3 微生物白云石模式的实验依据

Vasconcelos等<sup>[5,9]</sup>、Warthmann等<sup>[7]</sup>、van Lith<sup>[8]</sup>对微生物白云石形成模式分别进行了实验验证。实验在厌氧条件下进行,培养基是从巴西Lagoa Vermelha潟湖中分离出来的菌株,模拟该潟湖的自然条件:高盐度、高pH值(8.0~8.5)、高的碳酸盐碱度、 $\text{Mg}/\text{Ca}$ 值为6/1,由此得到了方解石、高 $\text{Mg}$ 方解石及白云石的沉淀。天然和实验产生的白云石在形态和结构上具

有相似性,这为微生物对白云石沉淀作用的影响提供了坚实的证据。

实验证明了硫酸盐还原细菌的现代种在合成的厌氧、超盐度介质中,在一定的条件下能够对白云石的形成起媒介作用。由纯的硫酸盐还原细菌菌株通过微生物媒介作用产生白云石,证实了Vasconcelos等<sup>[6]</sup>提出的微生物白云石模式。一般认为,动力障碍在地表条件下制约着白云石的形成。培养实验证明,特别的硫酸盐还原细菌能作为媒介克服动力障碍,造成白云石的沉淀。微生物的新陈代谢活动使得pH值提高,能够除去动力障碍因子——硫酸根离子,导致镁离子和重碳酸根离子浓度增加,并使微晶体成核。

天然和实验产生的白云石在晶体形态和结晶学上具有相似性,这是所述微生物在实验中参与白云石沉淀过程的有力证据。地球早期历史中,厌氧微生物细菌可能对白云石的产生特别重要,因为当时的厌氧条件远较现代广泛。

### 4 微生物白云石模式在现代和古代沉积中的证实及应用

利用与Lagoa Vermelha潟湖相似的野外研究与实验室培养试验相结合的方法,在世界各地现代沉积环境中微生物白云石模式已经得到了较多的证实,其中包括厌氧和氧化两类条件,主要是具有硫酸盐还原细菌的厌氧条件<sup>[8,29]</sup>,其他还有耐盐需氧细菌(halophilic aerobic bacteria)<sup>[30-32]</sup>和甲烷形成的条件。

#### 4.1 Coorong潟湖生物成因白云石

南澳大利亚Coorong地区远端季节性海岸潟湖是白云石研究的经典之地,经过了许多学者的研究<sup>[33-37]</sup>。该区的白云石被认为是渗滤回流机理或蒸发泵机理的白云石化作用所致,或简单地认为是原生沉淀白云石。Wright<sup>[38-39]</sup>(1999年、2000年),Wright等<sup>[29]</sup>(2005年)对上述传统观点进行了挑战,提出了生物成因模式,认为白云石沉淀障碍被以底栖微生物群占绝对统治的厌氧盐生态系统下的微生物硫酸盐还原作用克服了。这些障碍是:(1) $\text{Mg}^{2+}$ 高的水合能量<sup>[16,40-41]</sup>;(2)极低的 $\text{CO}_3^{2-}$ 浓度和活度<sup>[42]</sup>;(3)相对牢固结合的中性 $\text{MgSO}_4^0$ 离子对,很低的硫酸盐浓度<sup>[27-28,43]</sup>。Wright等<sup>[29]</sup>用Coorong地区远端季节性海岸潟湖野外工作和实验模拟相结合的方法验证了Coorong潟湖白云石形成的生物模式。



## 4.2 阿布扎比萨勃哈白云岩与微生物的关系

阿拉伯海湾代表现代白云石形成的典型环境,萨勃哈或蒸发泵模式即建立在该地区白云石和环境的基础上,白云石形成于超盐度环境中并与石膏、硬石膏密切共生(图 2)。本区已完成大量的沉积学和水文地质学工作,但对于在此环境中生长着微生物及其与白云石形成的联系方面,报道很少。最近, Bontognali 等<sup>[44]</sup>研究了阿拉伯湾阿布扎比萨勃哈白云石的形成与微生物活动之间的关系。

研究选择在阿布扎比海岸萨勃哈横切潮间至潮上带的三个地点(图 2 中 A、B、C 处),发现微生物丛

与白云石密切共生,利用装有冷传导系统的扫描电子显微镜观察,发现自生白云石沉淀在由微生物席组成的外聚合物内,说明微生物在白云石形成过程中在起作用。在流行的模式中,微生物白云石的沉淀与孔隙水中保持高 pH 值和碱度的积极的微生物活动有关。这一模式运用到阿布扎比海岸萨勃哈环境中能解释出现在潮间带表面微生物丛中白云石的形成,但不能解释潮上带白云石的形成。潮上带有大量埋藏的白云石,但没有广泛的微生物活动的表现。Bontognali 等<sup>[44]</sup>用非生物机理来解释潮上带白云石的形成,这是以外细胞聚合物作为模板而形成的白云石。

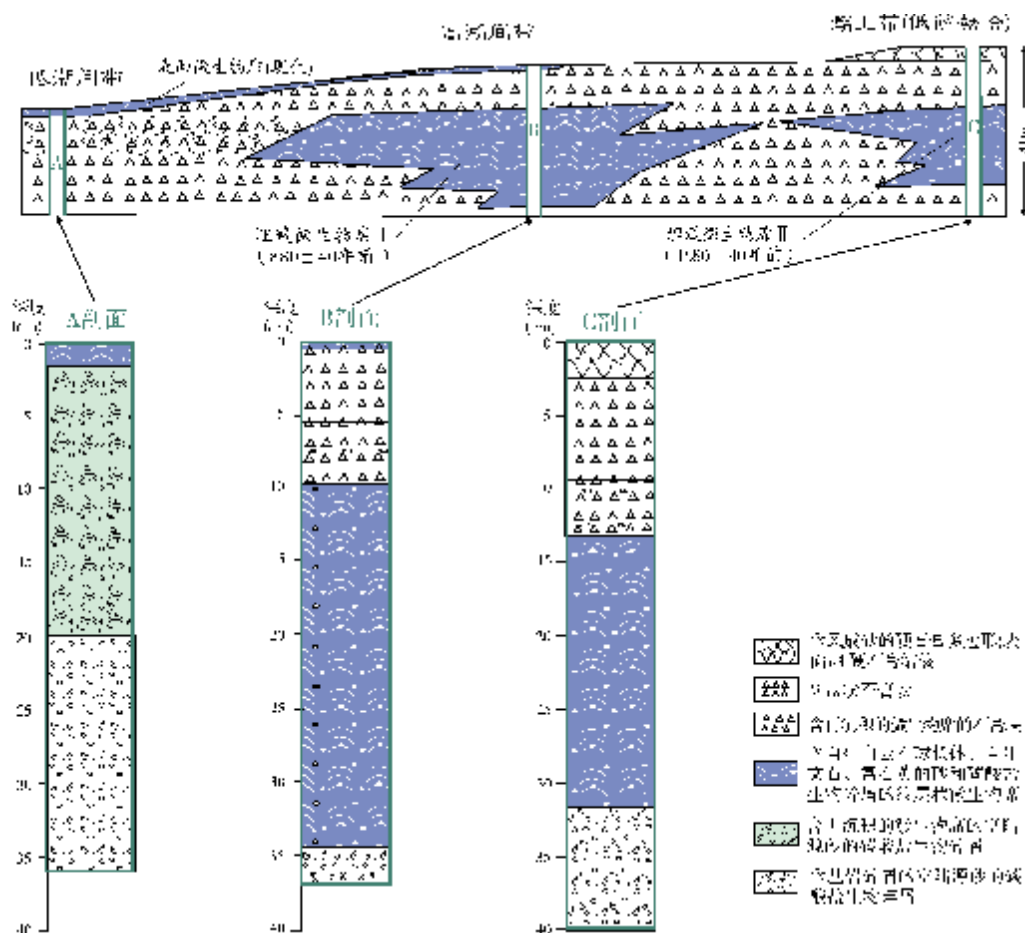


图 2 阿拉伯海湾阿布扎比海岸萨勃哈理想剖面(据文献[44],略有修改)

## 4.3 西印度外陆棚边缘碳酸盐台地白云岩与微生物的关系

Rao 等<sup>[45]</sup>研究了西印度外陆棚边缘发育的一个

碳酸盐台地,晚更新世白云岩组成了该台地的壳,其主要矿物是白云石。经详细的宏观、微观岩石学和地球化学研究,证明晚更新世白云岩壳由白云质叠层石组成,这是由微生物丛捕集和粘集沉积物碎屑而

形成的。白云质叠层石解释为是在超盐度、厌氧的硫酸盐还原条件下形成的。硫酸盐还原微生物及其伴生的生物鞘,它们的腐烂促进了白云石的形成。Rao 等认为微生物白云石模式可能与以隐藻纹层为特征的海相地层中古代块状白云岩的形成有关<sup>[45]</sup>。

#### 4.4 意大利南部北 Calabria 上三叠统潮间带白云岩与微生物的关系

Mastandrea 等<sup>[46]</sup>对意大利南部北 Calabria 上三叠统 Dolomia Principale 组的潮间带白云岩进行了详细的显微结构和地球化学研究。碳酸盐岩由叠层石白云岩、凝块石白云岩和泥晶白云岩组成。叠层石和凝块石生长于潮下带,形成了高起伏的生物建造。板状低起伏的叠层石和局部具核形石是潮间—潮上带的特征。微生物碳酸盐岩由两种组构保存的白云岩组成。类型 1 由小晶体(<5 μm)组成,形成暗色纹层和凝块;类型 2 由大晶体(5~60 μm)组成,形成了叠层石中的浅色纹层和凝块石叠层石的浅色杂基。

细菌状的化石在微生物碳酸盐岩中被发现,它们可能来自微米级球状细菌和似球状的纳米级可疑的极小细菌。粒状结构的区域可能代表细菌引起的有机质的化石降解产物。这些特征在潮间—潮上带微生物碳酸盐岩中有见到,但没有见到生物碎屑和骨粒。然而,菌类化石在叠层石的暗色纹层中特别发育。暗色泥晶纹层和凝块石中的强自动荧光说明有机质在此集中。

Dolomia Principale 组微生物白云岩形成于超盐度的环境中,白云石的富 Ca 性、极细粒的晶体以及正的  $\delta^{18}\text{O}$  值,说明这种白云岩是通过蒸发白云石化模式形成的。在组构保存的白云石中,细菌类化石的出现说明细菌、有机质的降解与微生物碳酸盐有关系。另外,微生物白云石可能是细菌新陈代谢的产物,这可能通过硫酸盐在局限的潮间环境中还原而实现。

#### 4.5 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段白云岩的微生物成因

鄂尔多斯盆地中部气田的主力气层是奥陶系马家沟组五段,马家沟组沉积于局限的陆表海环境。在其沉积时期,华北地台转变为干旱炎热的气候,盆地基底抬升,海平面下降。盆地内补给的海水少,海水循环差、盐度高,沉积了硬石膏岩、石盐岩及少量白

云岩,成为含白云岩的硬石膏—白云岩盆地。盆地边缘盐度较低,发育硬石膏—白云岩盆缘坪、含石灰岩和硬石膏的白云岩盆缘坪。西部水下隆起和北部邻近古陆的地带等受淡水影响大的地区,没有膏盐沉积,为白云岩沉积区<sup>[47-48]</sup>。这种沉积环境与现代的巴西 Lagoa Vermelha 潟湖和澳大利亚 Coorong 潟湖相似。因此,微生物白云石模式可以很好地解释本研究区的白云石形成机理。马家沟组五段形成于高盐度、高白云石饱和度环境,白云石沉淀太快,白云岩过度发育,反而导致孔隙不太发育。但它们经过岩溶作用的改造后,形成了大量岩溶孔隙,这也是鄂尔多斯盆地中部气田的主要储集空间。

## 5 结 语

根据巴西 Lagoa Vermelha 现代海岸潟湖白云石矿物学特征和形成条件的研究,以及模拟该潟湖条件的实验室白云石的沉淀,Vasconcelos 等提出了微生物白云石模式。这是自白云石发现 200 多年来研究工作的突破性进展。Lagoa Vermelha 潟湖水文学、热力学、动力学以及生物学等方面的参数对白云石的形成在本质上是相互联系和重要的。微生物因素把硫酸根离子从反应的抑制剂变成了催化剂,白云石一旦成核,就会在埋藏过程中长大。白云石形成于高盐度、局限以及有大量海水供应的环境,白云石的分布与沉积相关关系密切。

尽管不是所有的白云石都可以用微生物白云石模式来解释,但十多年来对现代沉积和古代沉积的研究以及模拟实验,都证明微生物白云石模式是有说服力和有生命力的。

#### 参 考 文 献

- [1] Zenger D H, Dunham J B, Ethington R L. Concepts and models of dolomitization[C]. SEPM Special Publication 28, 1980.
- [2] Sun S Q. Dolomite reservoirs; porosity evolution and reservoir characteristics[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(2): 186-204.
- [3] Zenger D H, Bourrouilh-Le Jan F G, Carozzi A V. Dolomite and the first description of dolomite[C]// Purser B, Tucker M, Zenger D. Dolomites: A volume in honour of Dolomieu. International Association of Sedimentologists Special Publication 21, 1994: 21-28.
- [4] Burns S J, McKenzie J A, Vasconcelos C. Dolomite formation and biogeochemical cycles in the Phanerozoic[J]. Sedimentology, 2000, 47(Suppl. 1): 49-61.
- [5] 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: 220-222.
- [6] Vasconcelos C, McKenzie J A. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67(3):378-390.
- [7] Warthmann R, Lith Y, Vasconcelos C, et al. Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments [J]. *Geology*, 2000, 28(12):1091-1094.
- [8] van Lith Y, Warthmann R, Vasconcelos C, et al. Microbial fossilization in carbonate sediments: A result of the bacterial surface involvement in dolomite precipitation[J]. *Sedimentology*, 2003, 50(2): 237-245.
- [9] Vasconcelos C, McKenzie J A, Warthmann R, et al. Calibration of the  $\delta^{18}\text{O}$  paleothermometer for dolomite precipitated in microbial cultures and natural environments[J]. *Geology*, 2005, 33(4): 317-320.
- [10] Adams J F, Rhodes M L. Dolomitization by seepage refluxion [J]. *AAPG Bulletin*, 1960, 44(12):1912-1920.
- [11] Deffeyes K S, Lucia F J, Weyl P K. Dolomitization of recent and Plio-Pleistocene sediments by marine evaporate waters on Bonaire, Netherlands Antilles[C]// Pray L C, Murray R C. Dolomitization and limestone diagenesis. SEPM Special Publication 13, 1965:71-88.
- [12] Hsu K J, Siegenthaler C. Preliminary experiments on hydrodynamic movement induced by evaporation and their bearing on the dolomite problem[J]. *Sedimentology*, 1969, 12 (1-2): 448-453.
- [13] Badiozamani K. The dorag dolomitization model—Application to the middle Ordovician of Wisconsin. *Journal of Sedimentary Petrology*[J], 1973, 43(4):965-984.
- [14] Land L S. Holocene meteoric dolomitization of Pleistocene limestones, North Jamaica[J]. *Sedimentology*, 1973, 20(3): 411-424.
- [15] Davis G R, Smith L B Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [16] Lippmann F. *Sedimentary Carbonate Minerals* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1973.
- [17] Land L S. Failure to precipitate dolomite at 25°C from dilute solution despite 1000-fold oversaturation after 32 years[J]. *Aquatic Geochemistry*, 1998, 4(3-4): 361-368.
- [18] Land L S. The origin of massive dolomite [J]. *Journal of Geological Education*, 1985, 33(3):112-125.
- [19] Machel H G, Mountjoy E W. Chemistry and environments of dolomitization —A reappraisal[J]. *Earth-Science Reviews*, 1986, 23(3): 175-222.
- [20] Sibley D F, Gregg J M. Classification of dolomite rock textures [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1987, 57(6): 967-975.
- [21] Neher J, Roher E. Bakterien in tieferliegenden gesteinslagen [J]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 1958, 52(2): 619-625.
- [22] Folk R L. SEM imaging of bacteria and nannobacteria in carbonate sediments and rocks[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63(5): 990-999.
- [23] Krumbein W E. Calcification by bacteria and algae[C]// Trudinger P A, Swaine D J. Biogeochemical cycling of mineral-forming elements. Amsterdam: Elsevier, 1979: 47-62.
- [24] Gebelein C D, Hoffman P. Algal origin of dolomite lamination in stromatolitic limestone[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1973, 43(3): 603-611.
- [25] Warren J K. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1): 1-81.
- [26] Höhn A, Tobschall H J, Maddock J E L. Biogeochemistry of a hypersaline lagoon east of Rio de Janeiro, Brazil [J]. *Science of the Total Environment*, 1986, 58(1-2):175-185.
- [27] Baker P A, Kastner M. Constraints on the formation of sedimentary dolomite[J]. *Science*, 1981, 213: 214-216.
- [28] Morrow D W, Ricketts B D. Experimental investigation of sulfate inhibition of dolomite and its mineral analogues[C] // Shukla V, Baker P A. Sedimentology and geochemistry of dolostones. SEPM Special Publication 43, 1988: 27-38.
- [29] Wright D T, Wacey D. Precipitation of dolomite using sulphate-reducing bacteria from the Coorong Region, South Australia: Significance and implications [J]. *Sedimentology*, 2005, 52(5): 987-1008.
- [30] Rivasdoneyra M A, Delgado R, Delgado G, et al. Precipitation of carbonates by *Bacillus* sp. isolated from saline soils[J]. *Geomicrobiology Journal*, 1993, 11(3-4):175-184.
- [31] Sánchez-Román M, Vasconcelos C, Schmid T, et al. Aerobic microbial dolomite at the nanometer scale: Implications for the geologic record[J]. *Geology*, 2008, 36(11): 879-882.
- [32] Sánchez-Román M, McKenzie J A, de Luca Rebello Wagener A, et al. Presence of sulfate does not inhibit low-temperature dolomite precipitation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 285(1-2):131-139.
- [33] Skinner H C W. Precipitation of calcian dolomites and magnesian calcites in the southeast of South Australia[J]. *American Journal of Science*, 1963, 261(5): 449-472.
- [34] Von Der Borch C C. Stratigraphy and formation of Holocene dolomitic carbonate deposits of the Coorong area, South Australia [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1976, 46 (4): 952-966.
- [35] Von Der Borch C C, Lock D E. Geological significance of Coorong dolomites[J]. *Sedimentology*, 1979, 26(6):813-824.
- [36] Botz R W, Von Der Borch C C. Stable isotope study of carbonate sediments from the Coorong region, South Australia [J]. *Sedimentology*, 1984, 31(6): 837-849.
- [37] Warren J K. Sedimentology and mineralogy of dolomitic Coorong

- lakes, South Australia [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1990, 60(6):843-858.
- [38] Wright D T. The role of sulphate-reducing bacteria and cyanobacteria in dolomite formation in distal ephemeral lakes of the Coorong region, South Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 126(1-4):147-157.
- [39] Wright D T. Benthic microbial communities and dolomite formation in marine and lacustrine environments—A new dolomite model[C]// Glenn C R, Prevot L L, Lucas J. *Marine Authigenesis: From global to microbial*. SEPM Special Publication 66, 2000:7-20.
- [40] Dasent W E. *Inorganic Energetics* [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- [41] Slaughter M, Hill R J. The influence of organic matter in organogenic dolomitization[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1991, 61(2):296-303.
- [42] Garrels R M, Thompson M E. A chemical model for seawater at 25°C and one atmosphere total pressure[J]. *American Journal of Science*, 1962, 260(1):57-66.
- [43] Usdowski H E. The formation of dolomite in sediments[C]// Muller G, Friedman G M. *Recent developments in carbonate sedimentology in Central Europe*. Heidelberg: Springer-Verlag, 1967:21-32.
- [44] Bontognali T R R, Vasconcelos C, Warthmann R, et al. Dolomite formation within microbial mats in the coastal sabkha of Abu Dhabi (United Arab Emirates)[J]. *Sedimentology*, 2010, 57(3): 824-844.
- [45] Rao V P, Kessarkar P M, Krumbein W E, et al. Microbial dolomite crusts from the carbonate platform off western India [J]. *Sedimentology*, 2003, 50(5): 819-830.
- [46] Mastandrea A, Perri E, Russo F, et al. Microbial primary dolomite from a Norian carbonate platform: Northern Calabria, southern Italy [J]. *Sedimentology*, 2006, 53(3): 465-480.
- [47] 侯方浩, 方少仙, 董兆雄, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 106-112.
- [48] 侯方浩, 方少仙, 赵敬松, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境模式[J]. *海相油气地质*, 2002, 7(1):38-46.

编辑:吴厚松

## Microbial Dolomite Models: An Overview

Yang Hua, Wang Baoqing

**Abstract:** Since discovery of dolomite in modern environments in 1960s, many dolomite models have been proposed but some long perplexed problems for the origin of dolomite formation has not been resolved. One of them is the inability to precipitate dolomite in the laboratory under conditions to replicate it that are found in modern natural environments. At the end of 20th century, Vasconcelos et al. simulated environmental conditions found in Lagoa Vermelha lagoon, Brazil, and successfully precipitated dolomite in the laboratory, which led to the formulation of the microbial model for dolomite formation. Many researchers have affirmed this model through researches on dolomite in South Australia, Arabian Gulf, outer shelf margin off western India, southern Italy and other places. The dolomite from Ordovician Majiagou Formation 5 Member in Ordos basin can be also considered as microbial origin. This microbial dolomite model may be significant in the research on mechanism of dolomite formation. As sulfate-reducing bacteria use the  $\text{SO}_4^{2-}$  ion, they will utilize the accompanying  $\text{Mg}^{2+}$  ions inside their cells, because they form strong ion pairs. Using  $\text{SO}_4^{2-}$  ions and release  $\text{Mg}^{2+}$  ions, microbes overcome the kinetic problems for their metabolism. The microbial factor converts sulfate ions from an inhibitor to a catalyst in chemical reactions of dolomite formation. Once dolomite is nucleated, the crystals continue to grow in the burial processes. Although the microbial dolomite model can not be used to explain every type of dolomite, both researches on modern dolomite environments and simulated experiments demonstrate that the model is convictive and viable.

**Key words:** Dolomitization; Dolostone; Diagenesis mechanism; Microbiogenesis; Model; Brazil; Ordos Basin

Yang Hua; male, Ph.D., Research Professor. Add: PetroChina Changqing Oilfield Company, 151 Weiyang Rd., Xi'an, Shaanxi, 710021, China