

doi:10.3799/dqkx.2017.029

三株嗜盐古菌诱导形成白云石

段 勇^{1,2}, 药彦辰^{1,2}, 邱 轩^{1,2}, 王红梅^{1,2*}

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要:白云石成因问题是地质学上长期悬而未决的难题之一。近年来,微生物诱导白云石沉淀逐渐成为白云石成因的重要理论之一,但其中微生物的作用机理远未探明。现生白云石主要分布于高盐环境,该环境中的优势菌群为嗜盐菌,包括嗜盐细菌和嗜盐古菌,因而此次选取三株嗜盐古菌 *Natrinema* sp.J7-1、*Natrinema* sp.J7-3 和 *Natrinema* sp.LJ7, 研究其诱导白云石沉淀的能力,并对比不同细胞浓度对白云石沉淀的影响,以期更深入地了解微生物在白云石形成中的作用。通过 X 射线衍射 (XRD) 检测沉淀物的物相,利用扫描电子显微镜 (SEM) 观察所得矿物形态,同时辅以能量色散谱分析 (EDS) 分析矿物的元素组成。实验结果表明三株嗜盐古菌皆可诱导球型、哑铃型、花椰菜型以及球形聚集体等白云石的形成,且在较高细胞浓度下诱导形成的矿物中白云石含量增多。分析表明细胞浓度的增加会导致细胞表面羧基含量的增加,从而为白云石的沉淀提供更多的成核位点,有利于 Mg 进入矿物晶格,从而诱导白云石沉淀,本结果进一步提高了对微生物白云石成因机理的认识。

关键词:白云石;嗜盐古菌;细胞浓度;盐度;矿物学。

中图分类号: P571

文章编号: 1000-2383(2017)03-0389-08

收稿日期: 2016-11-01

Dolomite Formation Facilitated by Three Halophilic Archaea

Duan Yong^{1,2}, Yao Yanchen^{1,2}, Qiu Xuan^{1,2}, Wang Hongmei^{1,2*}

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The dolomite formation problem has been puzzling geologists for a long time. Recently, microbial mediation is becoming one leading theory for dolomite formation, though many details still remain poorly understood. The exclusive occurrence of modern dolomite in saline environments leads to the investigation of the role of halophiles in dolomite formation. In this study, we focus on the effect of salinity and cell concentrations on dolomite mineralization with three halophilic archaea, *Natrinema* sp.J7-1, *Natrinema* sp.J7-3 and *Natrinema* sp.LJ7. These halophilic archaea were collected and subject to the mineral phase identification, morphology observation and element analysis via X-ray Diffraction (XRD) and Scanning Electronic Microscopy equipped with Energy Dispersive Spectrum (EDS). Results confirm that all the strains used are capable of facilitating the dolomite formation under higher salinity conditions, and the yields of dolomite increase with cell concentration. Morphologically, dolomite is of the shape of sphere, dumb-bell, cauliflower and conglobulation. It is proposed that high salinity and high cell density will result in the more carboxyl groups on cell surface which can serve as nucleation sites for dolomite formation, which is favorable for dolomite formation. The results offer more details about microbial role in dolomite formation and enhance our understanding about the mechanism.

Key words: dolomite; halophile; cell concentration; salinity; mineralogy.

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.41502317,41572323,41130207)。

作者简介:段勇(1991-),男,硕士研究生,主要从事微生物与矿物相互作用研究,ORCID:0000-0002-6725-9258.E-mail:dang-you@163.com

*** 通讯作者:**王红梅,ORCID:0000-0001-7621-7810.E-mail:hmwang@cug.edu.cn

引用格式:段勇,药彦辰,邱轩,等,2017.三株嗜盐古菌诱导形成白云石.地球科学,42(3):389-396.

白云石是由镁离子、钙离子和碳酸根离子组成的碳酸钙镁矿物[CaMg(CO₃)₂],区别于其他含镁碳酸盐矿物,标准白云石晶体中镁离子与钙离子的原子比例为 1:1,两种离子各自成层分布,且两种离子层依次交错排列,因此标准的白云石也被称为“有序白云石(ordered dolomite)”.在地质历史时期,特别是寒武纪之前,白云岩广泛分布,但其在现代海洋中却少有发现.另外,在地表温压条件下(25℃,标准大气压)实验室内通过大量的无机沉淀过程均不能形成有序白云石(Land,1998).这种难以解释的现象被称为“白云石之谜”(梅冥相,2012).除了理论研究意义,白云石成因研究也具有重要的经济价值.白云岩(主要成分为白云石的碳酸盐岩)是重要的油气储层,人们在四川盆地(刘树根等,2008)、鄂尔多斯盆地(南君祥和杨奕华,2001)等地均有发现其存在.

自白云岩发现至今的两百多年间,研究者就白云石的成因提出了诸多沉积模式,如“回流渗透”(Adams and Rhodes,1960)、“蒸发泵吸”(Hsü and Siegenthaler,1969)等模式,但都没能很好地解释古代白云石的成因.直到 20 世纪 90 年代,Vasconcelos 利用硫酸盐还原菌成功沉淀出白云石,并通过扫描电镜(SEM)观察发现,微生物成因的白云石颗粒大多呈纳米级的球型(Vasconcelos *et al.*,1995),由此提出“微生物白云石模式”(Vasconcelos and McKenzie,1997).随后,产甲烷菌(Kenward *et al.*,2009)、硫酸盐还原菌(Deng *et al.*,2010;Bontognali *et al.*,2012)、嗜盐细菌(Sánchez-Román *et al.*,2008)等均被报道能在地表温压条件下诱导白云石沉淀,并发现这些微生物诱导的矿物形态均为球型(Bontognali *et al.*,2008;Bontognali *et al.*,2012)、哑铃型、花椰菜型(VanLith *et al.*,2003),或球粒聚集体.早期研究表明硫酸盐还原菌消耗硫酸根并释放被硫酸根离子螯合的镁离子,是其诱导白云石沉淀的关键所在(Vasconcelos *et al.*,1995);但近年来的野外调查和实验室模拟实验均表明白云石可以在高硫酸盐浓度环境中沉积(Sánchez-Román *et al.*,2009).由此可见,硫酸盐浓度不是限制白云石形成的唯一因素.微生物通过呼吸作用消耗有机质产生二氧化碳,提高水体碱度被认为是其促进白云石形成的可能机理(Sánchez-Román *et al.*,2009).

此外,细胞以及细胞分泌的胞外聚合物(EPS)能吸附和聚集钙离子和镁离子,并促进成核反应的发生,进而诱导碳酸钙镁沉淀(Bontognali *et al.*,

2014).有研究表明细胞表面以及胞外聚合物中的多糖和氨基酸可促进水合镁离子的去水合过程,且可能促使镁离子与钙离子等比例进入矿物晶格中,从而形成碳酸钙镁沉淀(Wang *et al.*,2009;Roberts *et al.*,2013;Zhang *et al.*,2015).然而,微生物诱导白云石沉淀的详细机制仍未明确.

最新的研究表明盐度可能是影响微生物沉淀白云石的重要环境因子之一.现生白云石通常分布于咸水环境,例如阿布扎比海岸萨布哈(过饱和)(Patterson and Kinsman,1982)、巴西 Lagoa 潟湖(过饱和)(Vasconcelos and McKenzie,1997)、中国青海湖(盐度约 15‰)(于炳松等,2007)等.高盐环境的优势微生物种群为嗜盐菌,包括嗜盐细菌、嗜盐古菌,以及部分硫酸盐还原菌和产甲烷菌(Oren,2013).从上述环境中分离得到的纯菌株,包括 *Desulfovibrio brasiliensis* (Vasconcelos and McKenzie,1997)、*Virgibacillus marismortui* 123(Sánchez-Román *et al.*,2009)等亦能成功诱导白云石沉淀.盐度的改变,会促使细胞通过一系列的生理活动以维持细胞内部正常的渗透压,从而影响细胞表面官能团的性质.此外细胞浓度增加会增加细胞总的表面积以及细胞表面有关官能团的数量,进而影响镁离子和钙离子在细胞表面—水溶液之间的分配,这些因素皆有可能影响白云石的形成.到目前为止,尚未有人探明不同盐度以及细胞浓度是否对白云石沉淀有所影响.现生白云石大多发现于高盐环境中(Peterson *et al.*,1963;Patterson and Kinsman,1982;Vasconcelos and McKenzie,1997;姜文英等,2010;Last *et al.*,2012).在高盐环境中嗜盐细菌及嗜盐古菌是优势种群.虽然已有研究表明嗜盐细菌可以沉淀白云石(Sánchez-Román *et al.*,2008),但对嗜盐古菌诱导白云石沉淀的研究却相对薄弱,因此本文选用 3 株 *Natrinema* 属的嗜盐古菌作为材料,在 200‰和 280‰两个盐度下培养,收集对数生长期后期的细胞,并配制成细胞浓度(OD₆₀₀)为 1.0、1.5、2.0 和 2.5 的菌液用于沉淀白云石,以期回答盐度及细胞浓度对嗜盐古菌诱导白云石沉淀的影响.

1 材料与方法

1.1 供试菌株及培养方法

所用菌株为武汉大学陈向东教授提供的 *Natrinema* sp.J7-1、*Natrinema* sp.J7-3 和 *Natrinema* sp.LJ7 三株嗜盐古菌.基于 MGM 培养基

(Zhang *et al.*, 2012), 配制盐度为 200‰ 和 280‰ 的两种培养基培养嗜盐古菌. 每升盐度为 200‰ 的培养基的成分为: $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 18.00 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 21.00 g, KCl 4.20 g, 蛋白胨 5.00 g, 酵母提取物 3.00 g, CaCl_2 0.56 g, NaCl 156.14 g. 盐度为 280‰ 培养基, 每升含 NaCl 236.14 g, 其他与 200‰ 培养基成分相同. 用去离子水定容至 1 000 mL, 之后用 1.00 mol/L 的 NaOH 溶液将培养基的 pH 调至 7.50, 121 ℃ 灭菌 20 min 备用.

1.2 菌株生长曲线的测定

将灭菌后的培养基分装到 50 mL 无菌离心管中, 每管 20.0 mL; 取两管培养基作为空白对照. 活化 J7-1 菌液至对数期, 再取新鲜培养液重复活化一次. 取第二次活化的菌液, 按照 1 : 100 的比例接种到各离心管中, 用灭过菌的封口膜封口, 置于 45 ℃, 150 rpm 条件下培养. J7-3, LJ7 做相同处理, 所有样品设置两组平行样, 每隔 12 h, 用紫外分光光度测试各菌液在 600 nm 处的吸光度 (OD_{600}), 用以表示不同的细胞浓度.

1.3 白云石沉淀实验

首先, 配置盐度 200‰ 和 280‰ 的洗液各 500 mL, 用于细胞沉淀的洗涤. 每 500 mL 200‰ 盐度的洗液中含有 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 11.27 g, CaCl_2 0.62 g, NaCl 94.10 g. 280‰ 盐度的洗液中 NaCl 134.10 g, 其他成分与 200‰ 盐度洗液相同, 用去离子水定容至 500 mL.

接着, 配制盐度为 200‰、280‰ 的两种培养基各 1 000 mL, 分装至 500 mL 锥形瓶中, 按照菌液比培养基为 1 : 100 的比例分别将二次活化至对数期的菌液接种到两种新鲜培养基中, 然后在 45 ℃、150 rpm 条件下振荡培养至对数后期, $5\,000\times g$ 离心 10 min, 去除上清液, 得到细胞沉淀. 分别用盐度为 200‰、280‰ 的洗液洗涤对应盐度下的细胞沉淀, 之后 $5\,000\times g$ 离心 10 min, 去除上清液, 重复洗涤过程 3 次. 再用对应盐度的洗液稀释细胞, 得到细胞浓度 (OD_{600}) 分别为 1.0、1.5、2.0、2.5 的菌液各 30 mL, 取 10.00 mL 菌液备用.

然后, 按表 1 配制白云石沉淀体系. 其中, 0.20 mol/L 碳酸钠溶液为现配, 且以每次 100 μL 的速度缓慢加入, 边加边振荡以保证沉淀体系的均一性.

最后, 将细胞—沉淀溶液体系置于 45 ℃ 摇床中, 200 rpm 振荡 72 h 后, 通过增速离心收集沉淀. 增速离心方法为 $1\,000\times g$ 离心 2 min、 $3\,000\times g$ 离心 2 min、 $5\,000\times g$ 离心 5 min. 弃上清液后, 向沉淀

表 1 嗜盐古菌沉淀白云石实验体系的组成
Table 1 The components of dolomite precipitation experiments with halophilic archaea

组分	200‰沉淀体系	280‰沉淀体系
细胞悬液	10.00 mL	10.00 mL
1.00 mol/L MgCl_2	2.00 mL	2.00 mL
0.10 mol/L CaCl_2	2.00 mL	2.00 mL
0.20 mol/L Na_2CO_3	2.00 mL	2.00 mL
NaCl	1.75 g	2.55 g
超纯水	补至 20.00 mL	补至 20.00 mL

物中加入 20.00 mL 超纯水洗涤沉淀, 重复增速离心并弃上清液; 然后重复该洗涤过程一次. 将洗涤后的沉淀物冷冻干燥并置于干燥皿中备用.

1.4 物相分析

使用 Bruker AXS D8-Focus X 射线衍射仪 (XRD) 测定矿物相, 测试条件为 $\text{CuK}\alpha$ 射线, Ni 滤波, 40 kV, 40 mA, LynxEye192 位阵列探测器, 扫描步长 2θ 为 0.01° , 扫描速度每步 0.05 s, $\lambda = 1.540\,598\text{\AA}$.

利用扫描电镜/能量衍射谱分析 (SEM/EDS; Hitachi SU8010) 观察矿物形态以及分析元素组成, SEM 电压为 15 kV, EDS 电压为 20 kV, 激发电子束为 30~40 μA (王红梅等, 2015).

2 实验结果

2.1 嗜盐古菌的生长曲线

三株嗜盐古菌的生长曲线变化趋势接近 (图 1). 盐度为 200‰ 时, 三株菌都在约 80 h 进入稳定期; 而盐度为 280‰ 时, J7-1 和 J7-3 都在约 60 h 进入稳定期, LJ7 则在 80 h 之后才到达稳定期. 由生长曲线可确定三株嗜盐古菌在两种盐度培养基中到达对数后期的时间均在 40 h 左右, 因此选择该时间点作为后续成矿实验中细胞收集的时间.

2.2 物相鉴定结果

三株嗜盐古菌在盐度为 200‰ 及 280‰ 均能诱导白云石沉淀, 且在 200‰ 盐度下诱导白云石需要更高的细胞浓度, 而 280‰ 盐度下较低的细胞浓度就能成功诱导白云石沉淀 (图 2). J7-1 在盐度为 200‰ 培养基培养时, 细胞浓度 (OD_{600}) 为 2.5 的菌液诱导形成白云石和单水合方解石 (图 2① a_1 , 表 2); 细胞浓度 (OD_{600}) 为 2.0 的菌液诱导形成单水合方解石 (图 2① a_2); 细胞浓度 (OD_{600}) 为 1.5 的菌液诱导形成文石 (图 2① a_3); 细胞浓度 (OD_{600}) 为 1.0

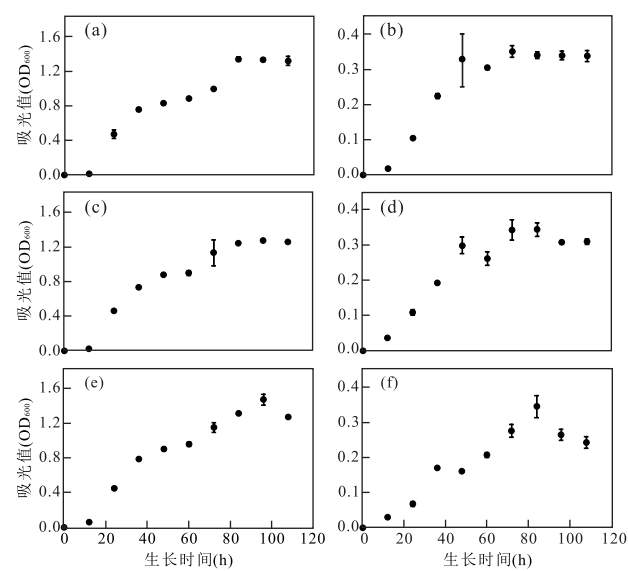


图 1 嗜盐古菌 J7-1、J7-3、LJ7 生长曲线

Fig.1 Growth curves of halophilic archaea J7-1, J7-3 and LJ7

a,c,e 分别为 J7-1、J7-3 和 LJ7 在 200‰盐度下的生长曲线;b,d,f 分别为 J7-1、J7-3 和 LJ7 在 280‰盐度下的生长曲线

的菌液诱导形成文石(图 2① a₁).J7-1 在盐度为 280‰培养基培养时,细胞浓度(OD₆₀₀)为 2.5 的菌液诱导形成白云石和单水合方解石(图 2② b₁,表

2);细胞浓度(OD₆₀₀)为 2.0 的菌液诱导形成单水合方解石(图 2② b₂);细胞浓度(OD₆₀₀)为 1.5 的菌液诱导形成单水合方解石(图 2② b₃);细胞浓度(OD₆₀₀)为 1.0 的菌液诱导形成文石(图 2② b₄).

J7-3 在盐度为 200‰培养基培养时,细胞浓度(OD₆₀₀)为 2.5 的菌液诱导形成白云石(图 2③ c₁);细胞浓度(OD₆₀₀)为 2.0 的菌液诱导形成单水合方解石(图 2③ c₂);细胞浓度(OD₆₀₀)为 1.5 的菌液诱导形成文石(图 2③ c₃);细胞浓度(OD₆₀₀)为 1.0 的菌液诱导形成文石(图 2③ c₄).J7-3 在盐度为 280‰培养基培养时,细胞浓度(OD₆₀₀)为 2.5 的菌液诱导形成白云石(图 2④ d₁,表 2);细胞浓度(OD₆₀₀)为 2.0 的菌液诱导形成白云石(图 2④ d₂,表 2);细胞浓度(OD₆₀₀)为 1.5 的菌液诱导形成白云石和文石(图 2④ d₃,表 2);细胞浓度(OD₆₀₀)为 1.0 的菌液诱导形成单水合方解石(图 2④ d₄).

LJ7 在盐度为 200‰培养基培养时,细胞浓度(OD₆₀₀)为 2.5 的菌液诱导形成白云石和单水合方解石(图 2⑤ e₁);细胞浓度(OD₆₀₀)为 2.0 的菌液诱导形成单水合方解石(图 2⑤ e₂);细胞浓度(OD₆₀₀)为 1.5 的菌液诱导形成单水合方解石和文石(图 2⑤

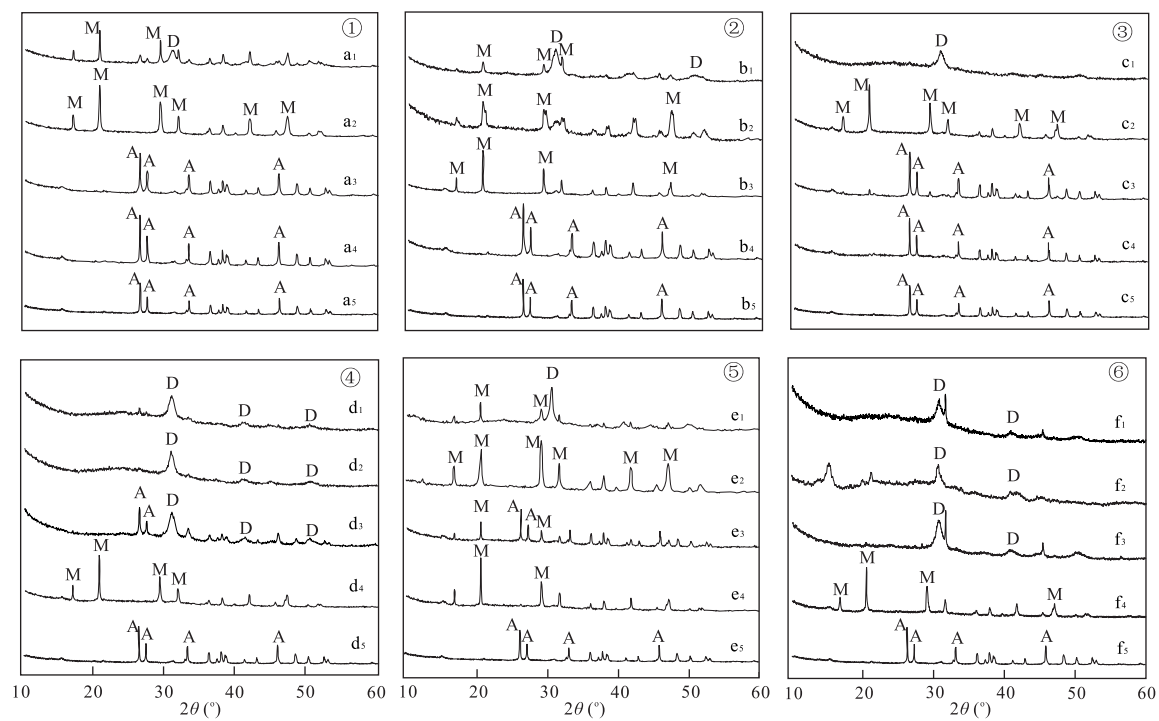


图 2 三株嗜盐古菌诱导形成的矿物的 XRD 图谱

Fig.2 XRD spectra of the precipitates induced by three halophilic archaeal strains

①,③,⑤分别表示 J7-1、J7-3、LJ7 在 200‰盐度下诱导形成的矿物 XRD 图谱;②,④,⑥分别表示 J7-1、J7-3、LJ7 在 280‰盐度下诱导形成的矿物 XRD 图谱.x1~5 分别表示沉淀体系中菌液浓度(OD₆₀₀)为 2.5、2.0、1.5、1.0 和 0;x 为 a,b,c,d,e,f.XRD 图谱上标注的 M,单水合方解石,A,文石,D,白云石

表 2 各沉淀体系中白云石特征峰的“*d* 值”及 *2θ* 角

Table 2 The “*d* value” and *2θ* of dolomite diffraction peaks in experiments with halophilic archaea

沉淀体系	<i>d</i> ₁₀₄ 值(A)	<i>2θ</i> 值(°)	<i>d</i> ₁₁₃ 值(A)	<i>2θ</i> 值(°)
J7-1-200-2.5 *	2.887 7	30.941		
J7-1-280-2.5	2.891 1	30.905	2.191 5	41.156
J7-3-200-2.5	2.911 6	30.681		
J7-3-280-1.5	2.893 4	30.879	2.191 0	41.167
J7-3-280-2.0	2.908 0	30.720	2.191 0	41.167
J7-3-280-2.5	2.893 4	30.879	2.193 0	41.130
LJ7-200-2.5	2.908 5	30.715	2.101 0	40.971
LJ7-280-1.5	2.897 8	30.831	2.199 0	41.009
LJ7-280-2.0	2.902 0	30.785	2.201 0	40.971
LJ7-280-2.5	2.897 8	30.831	2.200 9	40.972

注: * 为 J7-1-200-2.5; J7-1 为菌株名称,200 为沉淀体系的盐度(‰),2.5 为细胞浓度(OD₆₀₀)为 2.5.

e₃);细胞浓度(OD₆₀₀)为 1.0 的菌液诱导形成单水合方解石(图 2⑤ e₄).LJ7 在盐度为 280‰培养基培养时,细胞浓度(OD₆₀₀)为 2.5 的菌液诱导形成白云石(图 2⑥ f₁,表 2);细胞浓度(OD₆₀₀)为 2.0 的菌液诱导形成白云石(图 2⑥ f₂,表 2);细胞浓度(OD₆₀₀)为 1.5 的菌液诱导形成白云石(图 2⑥ f₃,表 2);细胞浓度(OD₆₀₀)为 1.0 的菌液诱导形成单水合方解石(图 2⑥ f₄).

2.3 白云石的形态特征

选取细胞浓度(OD₆₀₀)为 2.5 时嗜盐古菌诱导生成的沉淀物进行 SEM 分析,观察白云石的形态特征.结果显示,嗜盐古菌所诱导的白云石多为哑铃型(图 3a),球型(图 3b),花椰菜型(图 3c)和聚集体型(图 3d).通过能谱扫描确定矿物的元素组成,发现 Mg/Ca 均近似为 1 : 1.

3 讨论

微生物细胞表面富含羧基、磷酸基等官能团.在近中性或者碱性水体中,这些官能团处于去质子化状态,是吸附镁、钙离子的良好载体.微生物吸附镁、钙离子导致细胞微环境中出现高浓度的镁、钙离子,促进成核反应的发生.细胞微环境中镁、钙离子的浓度受细胞表面吸附能力、细胞浓度以及水体初始镁、钙浓度的影响.有研究表明,羧基和磷酸基是吸附阳离子最为有效的官能团,其中羧基吸附钙离子的能力较吸附镁离子的更强(Beveridge and Murray, 1980).微生物细胞吸附镁、钙离子后,水溶液中的镁、钙离子的活度相应减小;细胞浓度影响镁、钙离子在水体和细胞表面之间的分配,从而影响碳酸钙

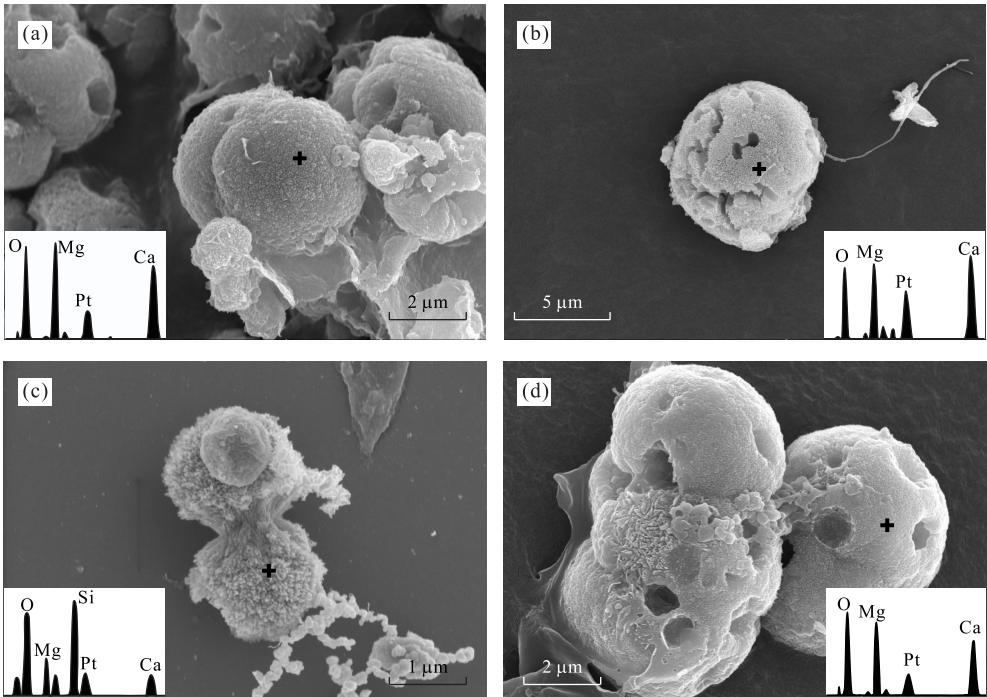


图 3 嗜盐古菌诱导形成的白云石的形态特征及元素组成

Fig.3 Morphology and elemental composition of dolomite induced by halophilic archaea

a.J7-1-200-2.5 体系中哑铃型白云石;b.J7-1-280-2.5 体系中球型白云石;c.LJ7-200-2.5 体系中花椰菜型白云石;d.J7-1-200-2.5 体系中聚集体型白云石

镁矿物的沉淀。

本研究表明 J7-1, J7-3 和 LJ7 这三株嗜盐古菌在 200‰ 盐度条件下, 在细胞浓度 (OD_{600}) 为 2.5 的细胞浓度下均能诱导白云石沉淀, 而在低浓度无法诱导白云石沉淀, 表明细胞浓度显著影响白云石的沉淀。较高的细胞浓度对白云石沉淀可能有两方面影响: (1) 提供更多富含镁离子、钙离子的晶核位点; (2) 适当调节镁、钙离子在水相和细胞相之间的分配, 使细胞表面微环境中的镁、钙离子以及对于白云石的饱和度达到最佳值。该推测与前人的研究类似 (Fortin *et al.*, 1997; García-Del-Cura *et al.*, 2014), 从而进一步说明较高的细胞浓度对白云石沉淀有促进作用。然而, 细胞浓度对白云石沉淀的具体机理仍然需要大量实验工作予以验证。

而在 280‰ 盐度条件下, 在较低的细胞浓度下即有白云石衍射峰的出现 (图 2④、⑥), 在以 LJ7 为材料时, 在细胞浓度 (OD_{600}) 为 1.5 时仅有白云石的衍射峰出现 (图 2⑥ f_3)。笔者发现在高盐度下, 更容易形成白云石, 这可能与嗜盐菌在高盐度下能形成更多的羧基官能团密切相关。虽然细胞浓度较低但在高盐环境中, 嗜盐古菌会在细胞表面合成更多的富含羧基的有机质, 使嗜盐古菌细胞表面羧基含量随着盐度的增加而增加 (Voegerl, 2014; 邱轩, 2014), 从而有效地促进镁离子与钙离子以 1:1 的比例进入碳酸盐晶格, 促进白云石的形成。前人的研究也发现, 具有诱导白云石沉淀能力的微生物, 其表面普遍含有高密度的羧基 (Kenward *et al.*, 2013); 细胞表面的羧基官能团对白云石沉淀有促进作用, 尤其是富羧基有机质有利于白云石成核 (Roberts *et al.*, 2013), 细胞表面的羧基对白云石沉淀可能有两重作用: 一方面, 羧基是吸附镁、钙离子的有效位点; 另一方面, 羧基参与的水合镁离子的脱水过程需要的吉布斯自由能较其直接脱水过程的低, 能够降低水溶碳酸镁分子与水溶碳酸钙分子形成过程中的焓变差值, 促使二者以 1:1 的速率形成并进入碳酸盐晶格 (Kenward *et al.*, 2013)。因此笔者推测细胞表面富羧基是微生物在更高盐度下更容易诱导白云石形成的决定性因素之一。

4 结论

本文通过模拟实验, 探讨了不同盐度以及不同细胞浓度对嗜盐古菌诱导白云石沉淀的影响。结果表明 3 株嗜盐古菌均具有诱导白云石的能力, 所形成的白

云石形态为球型、哑铃型、花椰菜型以及球型聚集体。高盐度 (280‰) 有利于嗜盐古菌沉淀白云石, 在实验考察的细胞浓度范围内 (OD_{600} 1.0~2.5) 均有白云石的形成; 而在较低盐度下 (200‰), 只有高细胞浓度下 (OD_{600} 2.5) 才有白云石的形成。高盐度下嗜盐古菌能在细胞表面合成更多的含羧基的有机质以及高细胞浓度下羧基总量的增加被认为是嗜盐古菌诱导白云石形成的关键所在。本研究对深入理解微生物成因白云石的机理具有重要意义, 同时也很好地解释了现生白云石均发现在高盐环境的现象。

致谢: 本研究 XRD 分析在中国地质大学 (武汉) 材料与化学学院完成, SEM 分析在中国地质大学 (武汉) 生物地质与环境地质国家重点实验室完成, 感谢审稿专家提出的建议和意见。在此一并致谢。

References

- Adams, J.E., Rhodes, M.L., 1960. Dolomitization by Seepage Refluxion. *AAPG Bulletin*, 44(12): 1912–1920. doi: 10.1306/0bda6263-16bd-11d7-8645000102c1865d
- Beveridge, T.J., Murray, R.G., 1980. Sites of Metal Deposition in the Cell Wall of *Bacillus Subtilis*. *Journal of Bacteriology*, 141(2): 876–887.
- Bontognali, T.R.R., McKenzie, J.A., Warthmann, R.J., et al., 2014. Microbially Influenced Formation of Mg-Calcite and Ca-Dolomite in the Presence of Exopolymeric Substances Produced by Sulphate-Reducing Bacteria. *Terra Nova*, 26(1): 72–77. doi: 10.1111/ter.12072
- Bontognali, T. R. R., Vasconcelos, C., Warthmann, R. J., et al., 2008. Microbes Produce Nanobacteria-Like Structures, Avoiding Cell Entombment. *Geology*, 36(8): 663–666. doi: 10.1130/G24755A.1
- Bontognali, T. R. R., Vasconcelos, C., Warthmann, R. J., et al., 2012. Dolomite-Mediating Bacterium Isolated from the Sabkha of Abu Dhabi (UAE). *Terra Nova*, 24(3): 248–254. doi: 10.1111/j.1365-3121.2012.01065.x
- Deng, S., Dong, H., Lü, G., et al., 2010. Microbial Dolomite Precipitation Using Sulfate Reducing and Halophilic Bacteria: Results From Qinghai Lake, Tibetan Plateau, NW China. *Chemical Geology*, 278(3): 151–159. doi: 10.1016/j.chemgeo.2010.09.008
- Fortin, D., Ferris, F., Beveridge, T.J., 1997. Surface-Mediated Mineral Development by Bacteria. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 35(1): 161–180.
- García-Del-Cura, M. Á., Sanz-Montero, M. E., De-Los-Rios, M.A., et al., 2014. Microbial Dolomite in Fresh Water Carbonate Deposits. *Sedimentology*, 61(1): 41–55. doi: 10.1111/sed.12047

- Hsü, K. J., Siegenthaler, C., 1969. Preliminary Experiments on Hydrodynamic Movement Induced by Evaporation and Their Bearing on the Dolomite Problem. *Sedimentology*, 12(1-2): 11-25. doi: 10.1111/j.1365-3091.1969.tb00161.x
- Jiang, W. Y., Wu, H. B., Chu, G. Q., et al., 2010. Origin of Dolomite in Lake Bayanchagan, Inner Mongolia and Its Palaeoclimatic Implications. *Quaternary Sciences*, 30(6): 1116-1120 (in Chinese with English abstract).
- Kenward, P. A., Fowle, D. A., Goldstein, R. H., et al., 2013. Ordered Low-Temperature Dolomite Mediated by Carboxyl-Group Density of Microbial Cell Walls. *AAPG Bulletin*, 97(11): 2113-2125. doi: 10.1306/05171312168
- Kenward, P. A., Goldstein, R. H., González, L. A., et al., 2009. Precipitation of Low-Temperature Dolomite from an Anaerobic Microbial Consortium; The Role of Methanogenic Archaea. *Geobiology*, 7(5): 556-565. doi: 10.1111/j.1472-4669.2009.00210.x
- Land, L. S., 1998. Failure to Precipitate Dolomite at 25 °C from Dilute Solution Despite 1 000-Fold Oversaturation after 32 Years. *Aquatic Geochemistry*, 4(3): 361-368. doi: 10.1023/A:1009688315854
- Last, F. M., Last, W. M., Halden, N. M., 2012. Modern and Late Holocene Dolomite Formation: Manito Lake, Saskatchewan, Canada. *Sedimentary Geology*, 281: 222-237. doi: 10.1016/j.sedgeo.2012.09.012
- Liu, S. G., Huang, W. M., Zhang, C. J., et al., 2008. Research Status of Dolomite Genesis and Its Problems in Sichuan Basin. *Lithologic Reservoirs*, 20(2): 6-15 (in Chinese with English abstract).
- Mei, M. X., 2012. Brief Introduction of "Dolostone Problem" in Sedimentology According to Three Scientific Ideas. *Journal of Paleogeography*, 14(1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Nan, J. X., Yang, Y. H., 2001. Diagenesis and Trap of the Dolomite Rock Reservoir in Changqing Gas Field. *China Petroleum Exploration*, 6(4): 44-49 (in Chinese with English abstract).
- Oren, A., 2013. Life at High Salt Concentrations. In: Dworkin, M., Falkow, S., Rosenberg, E., eds., *The Prokaryotes*. Springer, Berlin, 421-440.
- Patterson, R. J., Kinsman, D. J. J., 1982. Formation of Diagenetic Dolomite in Coastal Sabkha along Arabian (Persian) Gulf. *AAPG Bulletin*, 66(1): 28-43.
- Peterson, M. N. A., Bien, G. S., Berner, R. A., 1963. Radiocarbon Studies of Recent Dolomite from Deep Spring Lake, California. *Journal of Geophysical Research*, 68(24): 6493-6505. doi: 10.1029/JZ068i024p06493
- Qiu, X., 2014. Microbial Organics and Water Hydrochemical Conditions Intergrately Affect the Formation of Mg-CaCO₃ (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 45-50 (in Chinese with English abstract).
- Roberts, J. A., Kenward, P. A., Fowle, D. A., et al., 2013. Surface Chemistry Allows for Abiotic Precipitation of Dolomite at Low Temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(36): 14540-14545.
- Sánchez-Román, M., McKenzie, J. A., Wagener, A. L. R., et al., 2009. Presence of Sulfate does not Inhibit Low-Temperature Dolomite Precipitation. *Earth and Planetary Science Letters*, 285(1-2): 131-139. doi: 10.1016/j.epsl.2009.06.003
- Sánchez-Román, M., Vasconcelos, C., Schmid, T., et al., 2008. Aerobic Microbial Dolomite at the Nanometer Scale: Implications for the Geologic Record. *Geology*, 36(11): 879-882. doi: 10.1130/G25013A.1
- VanLith, Y., Warthmann, R. J., Vasconcelos, C., et al., 2003. Sulfate-Reducing Bacteria Induce Low-Temperature Ca-Dolomite and High Mg-Calcite Formation. *Geobiology*, 1(1): 71-79. doi: 10.1046/j.1472-4669.2003.00003.x
- Vasconcelos, C., McKenzie, J. A., 1997. Microbial Mediation of Modern Dolomite Precipitation and Diagenesis Under Anoxic Conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil). *Journal of Sedimentary Research*, 67(3): 378-390.
- Vasconcelos, C., McKenzie, J. A., Bernasconi, S., et al., 1995. Microbial Mediation as a Possible Mechanism for Natural Dolomite Formation at Low Temperatures. *Nature*, 377(6546): 220-222. doi: 10.1038/377220a0
- Voegerl, R. S., 2014. Quantifying the Carboxyl Group Density of Microbial Cell Surfaces as a Function of Salinity: Insights into Microbial Precipitation of Low-Temperature Dolomite (Dissertation). University of Kansas, Kansas, 8-12.
- Wang, D., Wallace, A. F., de Yoreo, J. J., et al., 2009. Carboxylated Molecules Regulate Magnesium Content of Amorphous Calcium Carbonates During Calcification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(51): 21511-21516.
- Wang, H. M., Liu, S., Liu, D., 2015. Comparison between Reductive Dissolution of Jarosite by Sulfate Reducing Bacteria and Dissimilatory Iron Reducing Bacteria. *Earth Science*, 40(2): 305-316. doi: 10.3799/dqkx.2015.023 (in Chinese with English abstract)
- Yu, B. S., Dong, H. L., Jiang, H. C., et al., 2007. Discovery of Spheric Dolomite Aggregations in Sediments from the Bottom of Qinghai Lake and Its Significance for Dolomite Problem. *Geoscience*, 21(1): 66-70 (in Chinese with English abstract)

with English abstract).

Zhang, F., Xu, H., Shelobolina, E.S., et al., 2015. The Catalytic Effect of Bound Extracellular Polymeric Substances Excreted by Anaerobic Microorganisms on Ca-Mg Carbonate Precipitation: Implications for the “Dolomite Problem”. *American Mineralogist*, 100 (2 — 3): 483—494.

Zhang, Z.Q., Liu, Y., Wang, S., et al., 2012. Temperate Membrane-Containing Halophilic Archaeal Virus SNJ1 Has a Circular dsDNA Genome Identical to that of Plasmid PHH205. *Virology*, 434 (2): 233 — 241. doi: 10.1016/j.virol.2012.05.036

附中文参考文献

姜文英, 吴海斌, 储国强, 等, 2010. 内蒙古巴彦查干湖白云石

的成因及其环境意义. 第四纪研究, 30(6): 1116—1120.

刘树根, 黄文明, 张长俊, 等, 2008. 四川盆地白云岩成因的研究现状及存在问题. 岩性油气藏, 20(2): 6—15.

梅冥相, 2012. 从 3 个科学理念简论沉积学中的“白云岩问题”. 古地学报, 14(1): 1—12.

南君祥, 杨奕华, 2001. 长庆气田白云岩储层的成岩作用与成岩圈闭. 中国石油勘探, 6(4): 44—49.

邱轩, 2014. 微生物有机质与水化学条件协同影响碳酸钙镁矿物沉淀 (博士学位论文). 武汉: 中国地质大学, 45—50.

王红梅, 刘烁, 刘邓, 2015. 硫酸盐还原菌及异化铁还原菌对黄钾铁矾还原作用的对比. 地球科学, 40(2): 305—316.

于炳松, 董海良, 蒋宏忱, 等, 2007. 青海湖底沉积物中球状白云石集合体的发现及其地质意义. 现代地质, 21(1): 66—70.

《地球科学》

2017 年 4 月 第 42 卷 第 4 期 要目预告

二连盆地巴音都兰凹陷反转构造及成因机制	陈树光等
扬子北缘大洪山地区中元古代打鼓石群碎屑锆石年代学及其地质意义	孔令耀等
利用爆炸震源资料获得三分量旋转地震动	赖晓玲等
致密砂岩气层中成岩相对岩电特征的影响	刘洪平等
内蒙古西乌旗南部晚古生代侵入岩年代学、地球化学特征及地质意义	刘 敏等
西藏伦坡拉盆地古近系牛堡组烃源岩预测与评价	刘一茗等
玄武岩发育区砂岩储层特征及控制因素: 渤海南部 BZ34-9 与 KL6 区块对比	王 维等
沉积盆地断裂趋势带形成演化及其控藏作用	王伟锋等