

塔里木盆地柯坪地区寒武系微生物白云岩特征、成因及意义

胡文瑄¹,朱井泉²,王小林¹,由雪莲³,何凯⁴

(1. 南京大学地球科学与工程学院,江苏南京 210023;2. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029;

3. 中国地质大学海洋学院,北京 100083;4. 河南省地质调查院,河南郑州 450001)

摘要:生物礁(丘)碳酸盐岩是重要的油气储层。塔里木盆地关于生物礁的报道主要集中在奥陶系,而在寒武系中却少有发现。通过柯坪地区上寒武统丘里塔格下亚群中的叠层石白云岩和凝块石(礁)白云岩的野外产出特征和微观结构构造分析,认为凝块石白云岩主要形成于潮下带水动力条件较强的沉积环境,而叠层石白云岩则形成于潮坪—潮间水动力相对稳定的沉积环境。叠层石白云岩中发育纳米级球形颗粒及其组成的哑铃状、链状结构,并发育管状—片状结构。上述特殊的结构在成分上均为白云石,与微生物培养实验中沉淀的白云石在形态上基本一致,说明微生物调制作用是研究区寒武系白云岩重要的成因模式之一。丘里塔格下亚群中未见任何蒸发岩和黄铁矿,说明叠层石白云岩形成流体盐度未达到沉淀石膏的临界点,白云石沉淀流体中含有 SO_4^{2-} ,并且未发生明显的细菌硫酸还原作用。因此,前人提出的 SO_4^{2-} 抑制白云石沉淀的作用可能被夸大,结合白云岩成因研究新进展,认为白云石成因机理研究应更多考虑 Mg^{2+} 的水合作用。此外,对叠层石白云岩和凝块石白云岩的储集特征初步研究发现,其有可能成为天然气的潜在储层,值得引起重视。

关键词:叠层石白云岩;凝块石白云岩;微生物白云岩;白云石成因;寒武系;塔里木盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Characteristics, origin and geological implications of the Cambrian microbial dolomite in Keping area, Tarim Basin

Hu Wenxuan¹, Zhu Jingquan², Wang Xiaolin¹, You Xuelian³, He Kai⁴

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Reefal (biohermal) carbonate rocks are important petroleum reservoirs. In Tarim Basin, the occurrences of reefal facies in the Ordovician sequences have been well documented, whereas that in the Cambrian strata have been rarely reported. In this study, the occurrences of stromatolite dolomite and reefal dolomite in the Cambrian Qiulitage Formation at Keping area, Tarim Basin were reported. Based on careful field observations, the micro-structures of these microbial dolomite were investigated by using conventional microscope and scanning electron microscope (SEM). It is suggested that the microbial reefs formed in shallow subtidal environment where the water was turbulent, the deposition rate was relatively high and the platform was relatively open. In contrast, the stromatolite dolomites were developed in tidal flat-intertidal facies. Nanoscale spherical dolomite formed nanocrystal aggregates including dumbbell and chain-like structures. In addition, tubular and sheet-like aggregates were suggested to be in close association with the mineralization of extracellular polymeric substances (EPS). All the above nanostructures resemble the morphology observed in microbial culture experiments. These evidences support the conclusion that microbial mediation might have played an important role in the formation of the Cambrian dolomite. During the formation of microbially mediated dolomite, sulfate reducing bacteria did not play an important role because no pyrite was observed, then SO_4^{2-} may not serve as an important kinetic inhibitor for the precipitation of dolomite. Thus it is proposed that the hydration of Mg^{2+} should be emphasized in the future study on the origin of dolomite.

Key words: stromatolite dolomite, reefal dolomite, microbial dolomite, origin of dolomite, Cambrian, Tarim Basin

收稿日期:2014-11-14;修订日期:2014-11-20。

第一作者简介:胡文瑄(1959—),男,教授、博士生导师,石油天然气成藏机理、流体地质作用与成矿。E-mail:huwx@nju.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05005-002)。

碳酸盐岩是重要的油气储层,全球 50% 的碳酸盐岩储层产于白云岩中,北美碳酸盐岩中 80% 以上的油气储存在白云岩中^[1-2]。近年来,我国在碳酸盐岩中的油气勘探不断取得突破,特别是在白云岩储层中发现了若干大型油气田,如塔里木盆地和田河气田、鄂尔多斯盆地苏里格气田、四川盆地普光超大型气田等^[3]。前人研究表明,生物礁(丘)碳酸盐岩是良好的油气储层^[4-5]。在塔里木盆地,人们已经认识到生物礁(丘)碳酸盐岩具有良好的储集性能,并进行了大量研究,但都局限于奥陶系^[6-11],而对于寒武系生物礁(丘)碳酸盐岩的研究相对较少。

塔里木盆地西北缘柯坪地区寒武系发育两类典型的微生物白云岩:叠层石白云岩和凝块石白云岩。野外统计表明,这两种白云岩厚度总计达 156 m,占整个寒武系总厚度的 18.9%。因此,叠层石白云岩和凝块石白云岩是柯坪地区乃至塔里木盆地寒武系重要的白云岩类型。研究微生物白云岩的形成环境和分布规律具有重要意义。一方面,微生物调制白云石是白云石形成的重要方式,也是目前实验室正常温压条件下成功合成白云石的主要方式。从 Vasconcelos 等人^[12]在《自然》上著文以来,已有很多学者报道了在微生物作用下合成了白云石^[13-16],这证明了微生物的新陈代谢活动可以克服白云石形成的动力学障碍,从而促进白云石沉淀。但是,支持微生物调制白云石形成模式的地质证据主要来自现代沉积^[17-19],只有 Perri 和 Tucker^[20]与王小林^[21]分别报道了意大利三叠系叠层石白云岩和震旦系奇格布拉克组藻白云岩中存在微生物调制白云石成因的微观形貌学证据。然而,在整个地质历史时期,微生物调制作用是否是白云石形成的重要模式之一,仍然需要更多的地质证据。柯坪地区寒武系微生物白云岩是验证白云石微生物成因模式的良好素材。另一方面,由于微生物礁格架提供了原始孔隙,凝块石构成的生物礁(丘)白云岩表面差异溶蚀作用要强于其他类型的白云岩,据此可以推测,与其他类型白云岩相比,生物礁(丘)白云岩可能更加具有形成优良油气储层的潜力。因此,研究微生物白云岩的形成环境和分布对于研究深层白云岩储层的发育模式乃至预测储层的分布规律,都具有重要意义。

本文主要从岩石学和微观形貌学观察入手,介绍塔里木盆地柯坪地区微生物白云岩的宏、微观结构构造特征,并初步探讨叠层石白云岩的形成机理,分析叠层石白云岩和凝块石白云岩的形成环境。

1 地质背景

塔里木盆地位于中国西北部新疆维吾尔自治区境

内,为一具有陆壳变质基底的大型叠合盆地^[22-24]。研究区属于柯坪断隆构造区,位于塔里木盆地西北缘(图 1)。元古代晚期经塔里木运动形成的古塔里木板块,自早震旦世开始发生裂解,在其北部边缘发育南天山大陆裂谷盆地。随着寒武纪-早、中奥陶世地壳拉伸速率增大,南天山裂谷带进一步发展,导致塔里木板块与哈萨克斯坦板块分离,形成南天山陆间洋盆,柯坪地区属被动大陆边缘组成部分^[25]。从震旦纪到三叠纪,元古代形成的构造格局没有发生大的变化,尽管由于变质基底倾斜和拉张,使上覆地层的分布和性质有一定变化,但是浅海广布和海陆交汇的格局并没有改变^[26]。

塔里木盆地是中国最大的沉积盆地,已有 50 余年的油气勘探开发历史^[27]。碳酸盐岩与部分碎屑岩是主要的油气储层,而寒武系-奥陶系白云岩储层是碳酸盐岩油气储层中的主要组成部分。

该区寒武系主要为浅水碳酸盐岩台地沉积,下寒武统分为三个组,由下往上分别是玉尔吐斯组,肖尔布拉克组以及吾松格尔组。玉尔吐斯组底部为灰黑色含磷结核硅质岩、黑色-灰色薄层硅质岩、磷块岩夹薄层白云质灰岩或泥灰岩透镜体,含小壳化石;中部为黑色碳质页岩,含有小壳化石;上部为深灰色-灰白色薄层微晶白云岩^[25,28]。肖尔布拉克组主要为一套灰-深灰色薄层状粉晶白云岩。吾松格尔组为土黄色泥质岩与棕灰色-灰色薄层状白云岩互层,上部发育竹叶状白云岩与瘤状白云岩。中寒武统从下往上分为两个组,分别是沙依里克组与阿瓦塔格组。沙依里克组下部为灰-棕灰色薄层状粉晶白云岩夹土黄色泥质岩,中部为岩溶角砾岩,上部为一套可全盆对比的灰岩(云质灰岩)。阿瓦塔格组主要为一套灰-棕灰色薄层(条带)状粉晶白云岩与膏溶后形成的砖红色(土黄色)泥质岩互层。上寒武统为丘里塔格下亚群,岩性主要为白云岩,发育白云岩凝块石白云岩-叠层石白云

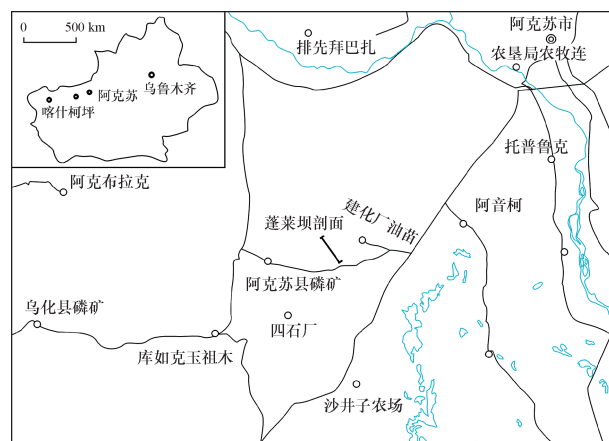


图 1 塔里木盆地柯坪地区地理位置

Fig. 1 Location of Kepingarea in Tarim Basin

岩-薄层状泥质白云岩向上变浅的米级旋回。这种米级旋回向上逐渐简单,叠层石白云岩消失,主要由白云岩与薄层状泥质白云岩组成,并且泥质白云岩层厚明显变薄。微生物白云岩主要分布于中寒武统的阿瓦塔格组 and 上寒武统的丘里塔格下亚群中,偶见于下寒武统的吾松格尔组和中寒武统的沙依里克组,其中,凝块石白云岩主要发育于丘里塔格下亚群下部(图2)。

2 叠层石白云岩结构

2.1 叠层石白云岩分布

柯坪地区蓬莱坝剖面寒武系中,叠层石白云岩主要分布在中寒武统阿瓦塔格组和上寒武统丘里塔格下亚群。阿瓦塔格组和丘里塔格下亚群按照岩性可以分为147层,其中叠层石白云岩占12层,尤其是在丘里

塔格下亚群下段,叠层石白云岩的分布最为集中。叠层石白云岩主要分布于向上变浅的米级沉积旋回顶部,一般来讲,单个沉积旋回从下往上可以分为浅灰色薄层状泥质白云岩、灰色薄层状粉晶白云岩和棕灰色叠层石白云岩(图3a,b)。阿瓦塔格组的叠层石白云岩主要呈水平状、波状,较为平缓;丘里塔格下亚群中的叠层石白云岩呈缓波状和丘状产出,单层叠层石白云岩的最大厚度可以达到91 cm,侧向延伸性较好。丘里塔格下亚群中上段,米级沉积旋回组合较为简单,主要是中-厚层颗粒白云岩和薄层泥质粉晶白云岩,其中,凝块石(藻粘结)白云岩主要分布于米级沉积旋回下部,呈丘状和层状产出(图3c-f)。

2.2 叠层石白云岩微观结构

镜下观察表明,叠层石由密集、(近)等厚的藻纹层组成,单个纹层厚度一般介于0.1~0.5 mm。其主要组成矿物为泥-粉晶白云石,白云石晶体直径一般小于0.03 mm(图4a)。单个纹层可进一步分为暗层和亮层,亮层是由明亮的相对较大的白云石晶体组成,厚度在120~440 μm。亮层中的白云石自形程度稍差,以它形-半自形为主。而暗层主要由相对较小的白云石组成,高分辨率场发射扫描电镜观测表明,暗层主要由自形泥晶白云石松散堆积而成(图4b)。除了自形泥晶白云石之外,暗层中还发现了一些具有特殊结构构造的白云石组分。例如,在自形白云石的晶间,发育亚微米级球形颗粒(粒径约0.5 μm),这些球形颗粒有时聚在一起,呈哑铃状产出(图4c)。此外,在自形白云石的晶体表面,还附着一些更为细小的纳米级球形颗粒,这些球形颗粒有时集中排列,呈链状产出,单个纳米颗粒尺寸介于40~100 nm(图4c-e)。除了球形结构,还有管状结构(图4f),与Perri和Tucker^[20]报道的意大利三叠系叠层石白云岩中的生物结构类似。

3 凝块石白云岩结构

3.1 凝块石白云岩野外特征

根据野外产出特征,柯坪地区寒武系凝块石白云岩可以分为具有层理结构的凝块石白云岩和团块状凝块石白云岩两类。团块状凝块石白云岩在丘里塔格下亚群中产出相对较少,外观呈深灰色,单层厚度为0.5~5 m,横向延伸不远,一般20~30 m,常呈透镜状或丘状产出,发育于灰色薄层状粉晶白云岩之上,其上伏岩层多为浅灰-灰白色条带状泥质白云岩(图3c)。而层状凝块石白云岩层厚可达0.5 m,主要发育于米

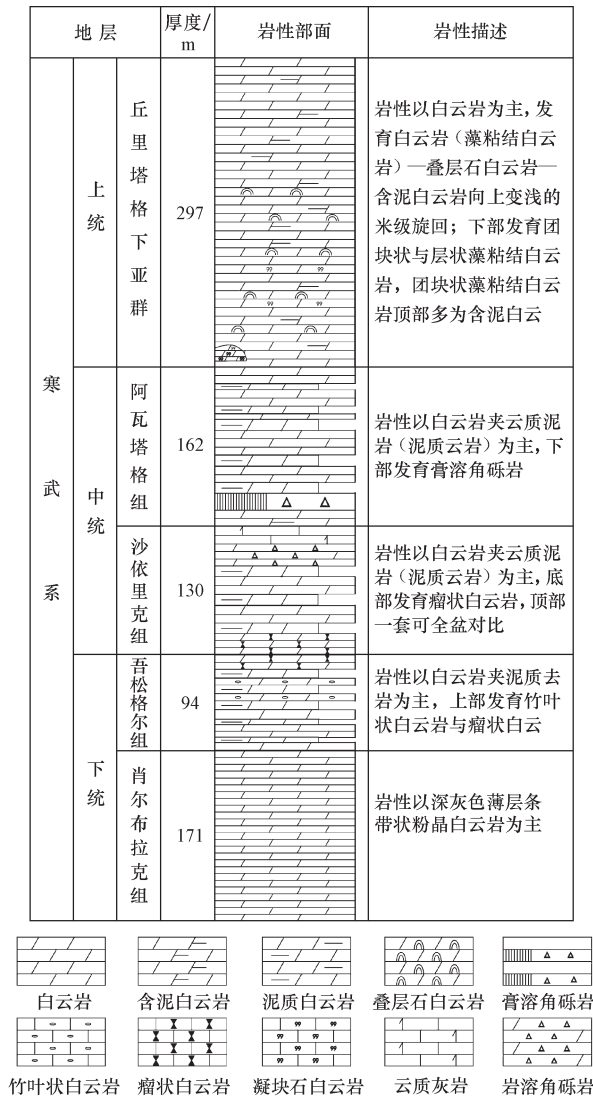


图2 塔里木盆地柯坪地区寒武系(不含玉尔吐斯组)岩性柱状图

Fig. 2 Lithological column of the Cambrian in Keping area in Tarim Basin (Yuertusi Formation was not involved)



图3 叠层石白云岩和凝块石白云岩野外产出特征

Fig. 3 Occurrences of stromatolite dolomite and reefal dolomite

- a. 由浅灰色薄层状泥质白云岩、灰色薄层状泥粉晶白云岩和棕灰色叠层石白云岩组成的向上变浅的米级沉积旋回, C_2 ; b. 丘状叠层石 C_3 ;
c. 团块状(丘状)凝块石礁(虚线框内), C_3 ; d. 层状凝块石礁白云岩(箭头所指), C_3 ; e, f. 块状(丘状)凝块石白云岩局部放大, C_3

级沉积旋回下部,其上覆岩层多为叠层石白云岩,有时见薄层状粉晶白云岩覆盖其上(图3d)。凝块石呈深灰-灰黑色,凝块间胶结物颜色较浅,并且在地表风化过程中差异明显,凝块间胶结物容易风化,所以从手标本上看,凝块石微生物礁呈疙瘩状。无论是凝块石还是凝块间胶结物,都已被彻底白云岩化。

在柯坪地区蓬莱坝剖面上,凝块礁丘礁层的基底多为藻屑滩和生屑滩,滩相沉积厚度不大,为0.5 m

左右,发育斜层理、交错层理,表明当时水动力条件较强。其上所发育的生物礁类型为凝块石灰泥丘,厚度约为0.8 m,造丘生物主要是蓝细菌等微生物群落。丘体顶部,发育大量溶蚀孔,上覆地层超覆于其上,表明生物礁在形成时位于构造高点,经历了相对海平面的降低,可能受到准同生表生溶蚀作用的影响。上覆地层为中灰色薄层状-条带状粉晶白云岩,见缓波状层理。

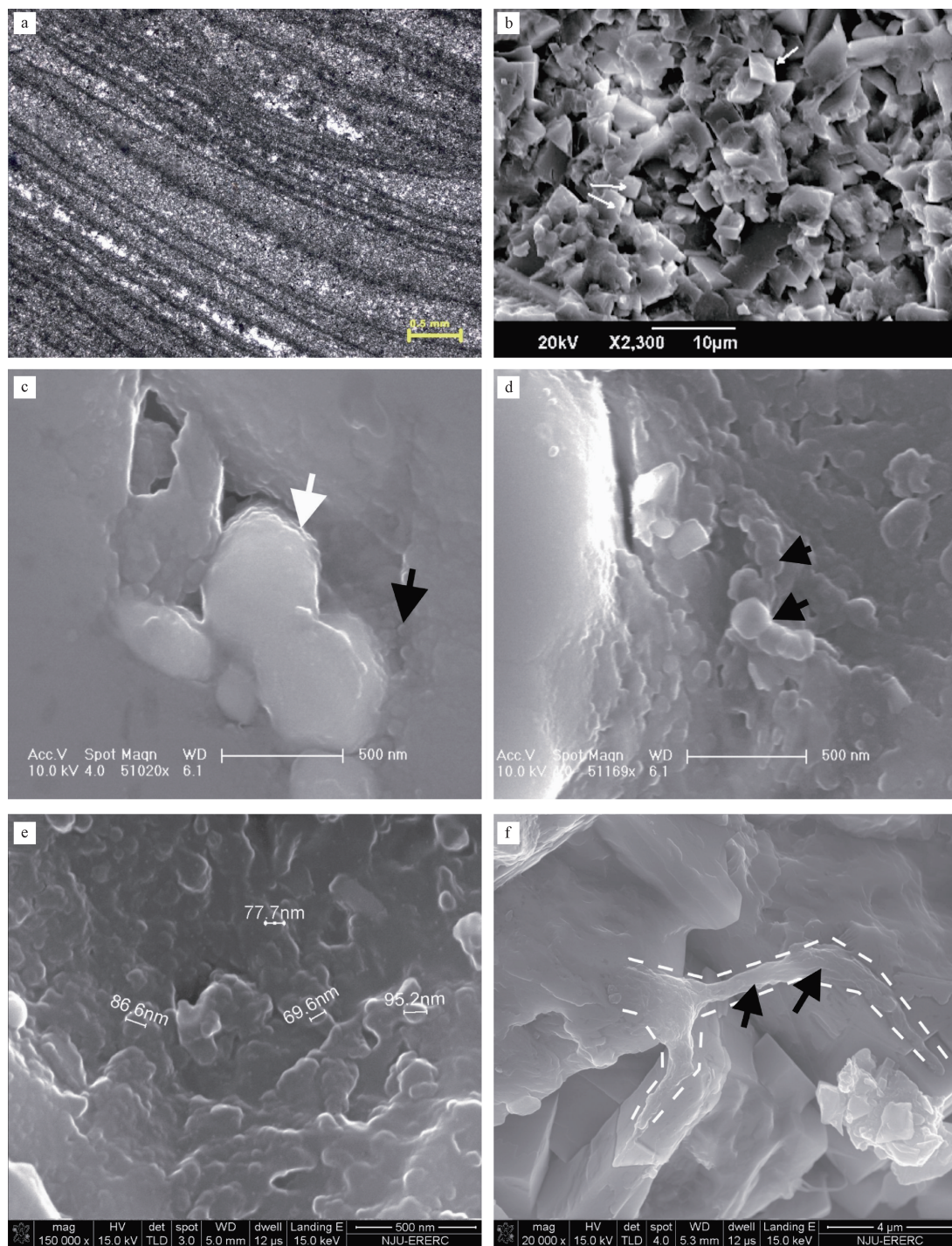


图4 叠层石白云岩微观结构

Fig. 4 Microstructure of stromatolite dolomite

a. 叠层石纹层结构,由暗层(富藻层)和亮层(富屑层)交替排列而成, C_1 ; b. 暗层主要由自形泥晶白云石组成, C_1 ; c. 纳米球形颗粒(黑色尖头)及其组成的哑铃状亚微米集合体(白色尖头), C_1 ; d. 由纳米球粒组成的链状结构, C_1 ; e. 纳米球粒一般小于100 nm, C_1 ; f. 管状-片状结构,疑似由微生物胞外聚合物包裹的丝状结构, C_1

凝块石主要由暗色凝块和浅色凝块间胶结物两种结构组分构成(图3e,f)。暗色凝块形状多呈不规则椭球体,一般为1~2 cm,凝块彼此连接呈网状结构,在空间上构成立体网状格架,格架间充填浅灰色组构,后期镜下观察证明其为亮晶胶结物(图5a)。

3.2 凝块石白云岩显微结构

研究区上寒武统丘里塔格下亚群产出的凝块石类型多样,经历了不同程度的白云岩化和重结晶作用,成岩改造强烈。尽管野外可以观察到明显的凝块结构,但是其内部原生显微结构构造却难以清楚观察和辨

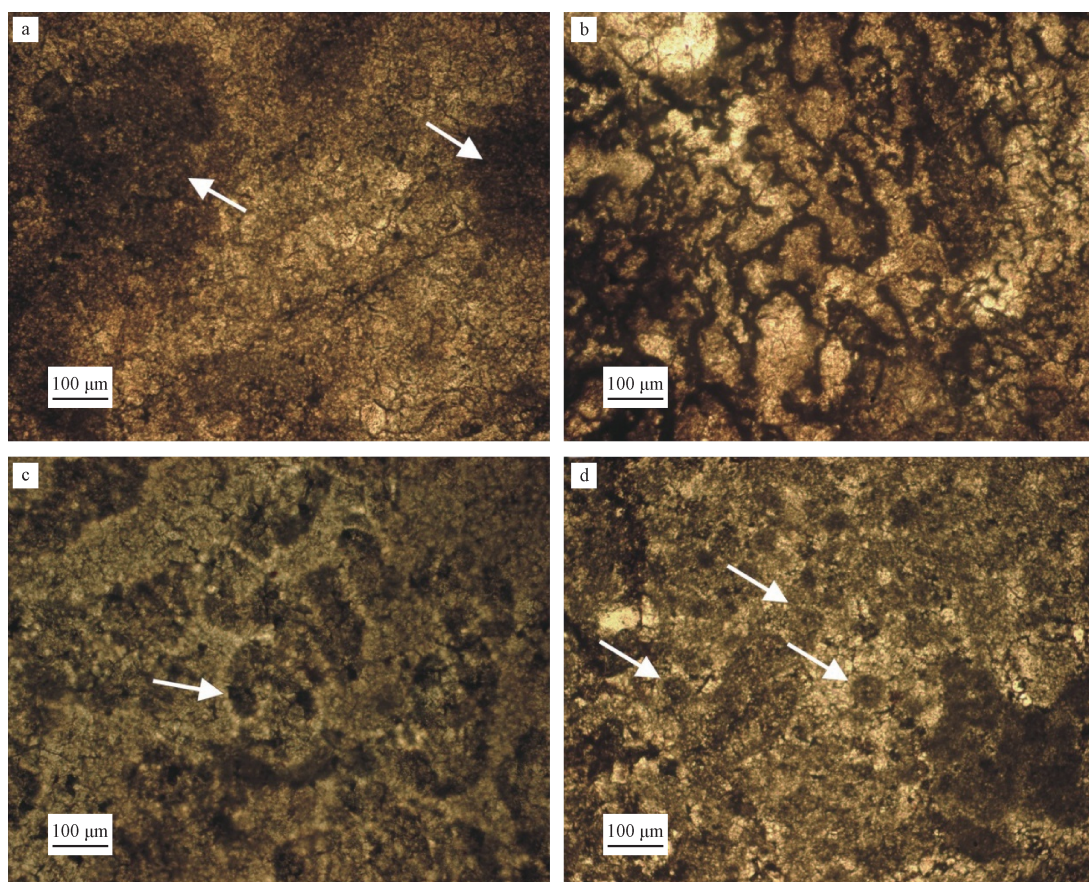


图5 凝块石白云岩显微照片

Fig. 5 Microphotos of reefal dolomite

a. 暗色泥晶凝块(箭头所指)和凝块间亮晶胶结物, C_1 ; b. 丝状体, C_1 ; c, d. 蓝细菌的管状结构(箭头所指), 隐约可见葛万菌缠绕的丝状体及钙化的管壁, C_1

识。选取保存条件较好的样品制成薄片,进行镜下鉴定,发现凝块石也主要有两种结构组分构成,即暗色凝块和凝块间亮晶胶结物(图5a)。凝块呈暗褐色斑团状,多为近圆形、不规则椭圆形枝状和叶片状的球状体,常相互连接成格架。凝块主要由粉晶白云石组成,呈半自形镶嵌结构,晶体表面比较污浊。凝块局部可见丝状体结构(图5b),丝状体相互缠绕并粘结泥晶碳酸盐岩颗粒,凝块内不含任何后生动物化石。凝块大多较为致密,镜下难以观察到有效孔隙,因此,凝块本身不发育具有储层意义的微孔隙。上述特征也表明凝块内的白云石应该形成于成岩作用的早期阶段,受后期成岩作用影响较弱。凝块间的亮晶白云石胶结物颜色较浅,主要为细晶-中晶白云石,呈自形-半自形镶嵌结构,晶体洁净明亮,发育晶间孔及晶间溶孔。与凝块内粉晶白云石相比,此类白云石晶体更粗大,晶形更好,晶体表面比较干净明亮,表明其形成环境和流体性质与凝块内白云石显著不同。

丘里塔格下亚群凝块石白云岩中发育大量薄壁微管状生物结构(图5c, d)。这些管状结构不分枝,横截面呈圆形,管体直径40 μm 左右,由暗色泥晶白云石组成。这种管状结构与古生代-中生代微生物岩中常见的钙质微生物蓝细菌 *Girvanella* 类似。

4 成因机理探讨

4.1 叠层石和凝块石形成环境

如前文所述,丘里塔格下亚群中的凝块石白云岩主要分为团块状(丘状)和层状(似层状)两类(图3c, d)。从团块状(丘状)白云岩的产状来看,其多生长在灰色薄层白云岩之上,上覆岩层为薄层状到条带状泥质白云岩。上覆薄层状到条带状泥质白云岩,主要为潮坪相静水沉积的产物,而下伏灰色薄层状白云岩反映水体较深的潮下沉积环境。因此,夹于两者之间的微生物礁应该发育于潮间带-潮下带环境,这说明蓝细菌类等微生物群体生长于盐度较为正常,水体能量适中的潮间-潮下带环境。从层状凝块石白云岩的产状来看,其上覆岩层为叠层石白云岩,下伏岩层为灰色薄层状粉晶白云岩。现代叠层石生长环境较为宽泛,从浅水、潮上带、潮间带和潮下带均有分布。例如,巴哈马海滩发育生长于正常海水环境中的巨型潮下带叠层石,阿拉伯海发育厘米级别的浅水叠层石^[29-30]。一般认为,在向上变浅的碳酸盐岩沉积旋回中,往往由旋回下部的凝块石向上变为叠层石,指示沉积在深水区

的凝块石相变为浅水区的叠层石^[31]。此外,巴哈马岛发育的现代凝块石的沉积水深通常大于叠层石^[32]。

实际上,叠层石沉积环境的水动力条件通常反映在叠层石的形态上。研究区叠层石呈波状或丘状产出,横向延伸性较好,表明其形成于潮坪-潮间带水动力相对较弱的沉积环境中。而层状凝块石微生物礁发育于向上变浅的米级旋回的下部或中、下部,那么其形成的环境应为潮间带以下水体较深的潮下带环境。另外,在凝块石微生物礁底部发现了高能滩相沉积,反映了凝块石形成于水动力条件较强的水体环境。现代沉积实例也证实了凝块石主要形成于水体较深的潮下带环境,例如关于巴哈马和鲨鱼湾地区微生物岩的研究表明,凝块石多发育于水体较动荡、沉积速率较快且相对开阔的浅潮下带环境,沉积的水深通常大于叠层石^[33-36]。综上所述,认为研究区凝块石微生物礁发育于水体较为动荡,相对开阔的浅潮下带环境。在海平面降低的过程中,水体变浅,光照以及水体能量满足菌藻类生命活动需求,菌藻类繁盛,一方面,其周围微环境适合碳酸盐岩沉淀,另一方面,通过捕获-粘连碳酸盐颗粒形成凝块石碳酸盐岩^[37-39]。凝块石和叠层石的形成模式见图6,叠层石主要形成于潮坪-藻坪环境,凝块石白云岩则在水下藻丘发育

4.2 微生物调制作用是寒武系白云岩的重要形成模式之一

叠层石富藻暗层自形白云石之间的纳米球形颗粒是构成亚微米级乃至微米级球形体的基本单位,因为所有亚微米级-微米级球形体内都发育50~100 nm的纳米级球粒,这些纳米球粒紧密堆积,形成哑铃状、链状结构。上述结构与 Bontognali^[15] 和 Sánchez-Román^[16] 在需氧和厌氧微生物培养实验中沉淀出来的原生白云石一致。Bontognali^[15] 的厌氧微生物培养实验表明,细菌在自身的新陈代谢过程中会产生大量的纳米级球粒结构,而且微生物具有自我保护机制,避免被埋葬在矿化后的矿物中。Sánchez-Román^[16] 观察了中度嗜盐需氧细菌 *Halomonas meridiana* 和 *Virgibacillus marismortui* 促进白云石沉淀的过程,在沉淀物

中发现了大量纳米级球粒结构,球粒直径绝大多数分布在50~100 nm,少数在100~200 nm。研究区上寒武统叠层石中的纳米球粒结构与实验室微生物培养实验中沉淀出的原生白云石的结构特点具有高度的相似性。

此外,已经发生白云石矿化的管状-片状体可能代表了菌层中某种丝状微生物的结构特征,它们分布在白云石晶体外部,表面较光滑,部分被包裹在白云石中,仅在晶体外部露出一小部分。这与 Lagoa Vermelha 潟湖菌层中一些丝状物类似,很可能是被细胞分泌胞外聚合物(EPS)或粘液包裹的丝状物矿化后保存下来的。

综上所述,叠层石白云岩中发育特殊的纳米-亚微米球形白云石和不规则管状白云石,证明微生物调制作用是寒武系白云岩重要的成因模式之一。这是继 Perri 和 Tucker^[20] 与王小林^[21] 分别报道三叠系和震旦系微生物成因白云石之外,微生物调制白云石成因模式的又一地质证据。

室温条件下微生物培养实验证明微生物活动可以克服白云石沉淀过程中的动力学障碍,这一认识为解决白云石成因难题指明了重要方向。然而,有关微生物活动如何克服白云石沉淀的动力学障碍这一问题仍然困扰着众多地质学家。最初, Baker 与 Kastner 的高温实验结果表明, SO_4^{2-} 在约 200 °C 的高温条件下抑制白云石的形成^[40]。进而,他们认为通过石膏沉淀或者硫酸盐还原作用,降低或者移除溶液中的溶解 SO_4^{2-} , 以促进白云石沉淀。从此,尽管有一些争论,但是 SO_4^{2-} 抑制白云石形成这一学说风靡一时。将 SO_4^{2-} 抑制说发扬光大的应属瑞士苏黎世 ETH 地质所的 C. Vasconcelos 与 J. A. McKenzie 小组。他们通过硫酸盐还原细菌(sulfate reduction bacteria, SRB)培养实验,在室温条件下沉淀出球形白云石,提出微生物调制白云石学说,并结合巴西东南部 Lagoa Vermelha 潟湖现代白云石沉积以讨论其学说的地质应用^[12,17]。部分学者认为,溶液中 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 通常以离子对形式存在, SRB 之所以能够促进白云石沉淀,是因为其新陈代谢过程消耗掉 SO_4^{2-} , 从而解放出“自由” Mg^{2+} ^[18,41,42]。然而, SO_4^{2-} 是否抑制白云石沉淀却备受争议,这主要是地质观察表明 SO_4^{2-} 与白云石形成过程密不可分:①石膏或者硬石膏通常与白云石共生,如柯坪地区阿瓦塔格组膏云岩;②地质研究表明,白云岩化流体盐度范围宽泛,在正常盐度与石膏饱和之间均适于白云石形成。也就是说,白云岩化流体中含有一定量的 SO_4^{2-} ^[43-44]。比如柯坪地区奇格布拉克组藻白云岩,其形成于盐度不高的正常潮坪环境^[21];③现代富 SO_4^{2-} 的强烈蒸发环境也有白云石沉淀^[45-46]。

事实上,微生物新陈代谢过程之所以能促进白云石沉淀,还与其他因素有关,并非仅仅与消耗 SO_4^{2-}

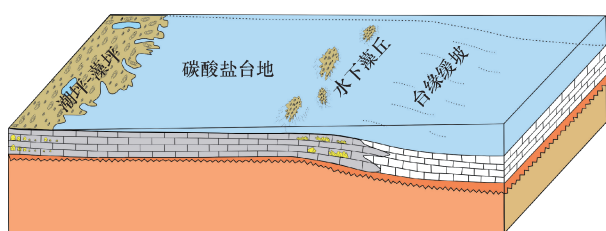


图6 寒武系丘里塔格组叠层石白云岩和凝块石白云岩形成环境

Fig. 6 Depositional environment of the Cambrian Qiulitage
Formation stromatolite dolomite and reefal dolomite

有关。例如,促进白云石沉淀的微生物不仅仅是硫酸盐还原细菌,某些嗜氧微生物的调制作用同样可以促进白云石沉淀^[16,47],甚至硫氧化细菌同样可以促进白云石沉淀^[48]。研究区上寒武统丘里塔格下亚群叠层石中未见任何黄铁矿,这表明 SRB 并非促进白云石沉淀的唯一微生物类型。另外, S            ^[49] 的细菌培养实验结果显示, SO_4^{2-} 在室温下并不阻碍白云石沉淀。因此,微生物调制白云岩化作用机理仍需要进一步研究,我们建议向 Mg^{2+} 的水合壁垒方向考虑。 Mg^{2+} 在水中以水合离子形式存在,其周围被多层水分子壳包裹,其中第一层水合壳由 6 个水分子组成,最为稳定 $[\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ ^[50]。由于 Mg^{2+} 的水合能力较强,研究克服其水合壳壁垒的机理是正确认识白云石成因的关键因素之一。理论上讲,溶液浓度的升高有利于离子水合壳的弱化^[42],但是就白云石来讲, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 以及 CO_3^{2-} 难以在高浓度条件下按照白云石晶体结构比例结合。威斯康星大学徐惠芳博士研究小组在研究低温 (25  ) 白云石无机沉淀机理研究方面取得了突破性进展。他们认为,晶体表面的 Mg^{2+} 被水偶极子围绕 (水合壳),从而阻碍其进入白云石晶格。而 HS^- 则与水偶极子的 H^+ 相互作用以弱化 Mg^{2+} 水合壳,消除白云石沉淀的动力学障碍,从而使得晶体表面的 Mg^{2+} 进入高镁方解石或者白云石晶格^[51],而方解石则为白云石沉淀提供成核中心。因此,微生物调制白云石模式也可能与上述过程类似。SRB 还原 SO_4^{2-} 的过程中会形成一定量的 HS^- ,而这些 HS^- 将有助于弱化 Mg^{2+} 的水合壳。多糖是微生物胞外聚合物的主要成分之一, Zhang^[52] 发现多糖可以发挥与 HS^- 类似的作用,一样可以促进白云石沉淀。因此,胞外聚合物的存在将降低白云石形成过程中的动力学障碍,从而促进白云石形成。总之,微生物调制作用可以促进白云石沉淀毋庸置疑,但其具体作用机理仍需进一步探讨。

4.3 微生物白云岩是潜在储集层

藻礁碳酸盐岩具有较好的储集空间,我国柴达木盆地第三系发育多套藻碳酸盐岩,研究显示,藻碳酸盐岩的储集性比非藻碳酸盐岩要好^[4-5,53]。在塔里木盆地,人们已经认识到生物礁(丘)碳酸盐岩具有良好的储集性能,并进行了大量研究,但都局限于奥陶系^[6-11],

而对于寒武系生物礁(丘)碳酸盐岩的研究尚处于空白阶段。

研究中发现,藻团块白云石与藻间胶结白云石具有不同的结构,并且在地表风化过程中也存在明显差异,藻间胶结白云石更容易风化。因此,埋藏过程中,在一定物理化学条件下,流体作用对两种白云石的溶蚀作用必定不同,容易形成次生孔隙(洞)。

由于本区藻白云岩经历了长期的成岩演化,大部分的原生孔隙已经消耗殆尽。但仍存在有少量的原生孔隙,其中以窗格孔隙最为常见。窗格孔隙主要存在于叠层石白云岩中的暗层(即藻层)中,常呈网格状孔洞群出现。窗格孔中的单个孔眼大小一般介于 $10 \sim 30 \mu\text{m}$,其内多为自形的粗-粉晶白云石充填,但也有些仍保留部分孔隙。

在部分叠层石白云岩中,尽管白云石晶体较小,为泥-粉晶级,但由于白云石晶体较为自形,仍有大量的晶间孔发育。尽管这些晶间孔一般较小,多为毛细管孔隙,但考虑到这类晶间孔常有窗格孔与其伴生,因而也不失为一种有效的储集岩,尤其对天然气而言,更是值得关注的储层类型。

此外,对研究区不同类型的白云岩样品做了孔隙度和渗透率的分析(表1)。结果表明尽管藻白云岩孔隙度一般(为1.2%),但渗透率较非常高。因此,广泛发育窗格孔的藻白云岩具有很大的储集潜力。

最近,在塔里木盆地深层(>6 000 m)钻遇到高压-超高压气层,其层位估计为中下寒武统。根据露头岩性分析,除了后期构造-热液改造形成的局部储集体外,能够形成具有一定规模横向展布的,最有可能是微生物白云岩储层。因此,关于上寒武统叠层石及凝块石白云岩形成条件及储集性能的研究,对于塔里木盆地深层天然气的勘探具有重要指导意义。

5 结论

1) 研究区寒武系微生物白云岩主要有叠层石白云岩和凝块石白云岩两种类型。根据野外产出特征,凝块石白云岩又分为团块状(丘状)和层状两类,凝块石主要由暗色凝块及凝块间白云石胶结物构成,其主要的造礁生物为蓝细菌,系由蓝细菌群落通过钙化、粘结等作用形成的凝块。凝块石主要形成于水体较动荡、沉积速率

表 1 不同类型白云岩的孔隙度和渗透率

Table 1 Porosity and permeability in different types of dolomite

岩石类型	泥 - 粉晶白云岩 (未溶蚀)	泥 - 粉晶白云岩、 膏盐(溶蚀)	藻白云岩	斑状白云岩	重结晶白云 岩(溶蚀)	重结晶白云 岩(未溶蚀)
孔隙度/%	0.9	3.35	1.20	1.68	3.65	1.41
渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	0.051	0.016	0.462	0.065	0.062	0.043

较快且相对开阔的浅潮下带环境,而叠层石白云岩主要形成于潮坪—潮间带水动力相对较弱的环境。

2) 叠层石白云岩纹层可以分为泥晶富有机质的暗层和晶体相对粗大贫有机质的亮层。暗层主要由自形泥晶白云石堆积而成,晶体表面和晶间发育特殊的纳米级球形颗粒及其集合体,此外还发育不规则管状—片状结构。上述特殊的结构在成分上均为白云石,与微生物培养实验中沉淀的白云石在形态上基本一致,因此微生物调制作用是塔里木盆地寒武系白云岩重要的成因模式之一。

3) 研究区上寒武统丘里塔格下亚群中未见任何蒸发岩和黄铁矿,说明叠层石白云岩形成流体盐度未达到沉淀石膏的临界点,也表明白云石沉淀流体中含有 SO_4^{2-} ,并且未发生明显的细菌硫还原作用。因此,前人提出的 SO_4^{2-} 抑制白云石沉淀的作用可能被夸大,白云石成因机理研究应更多考虑 Mg^{2+} 的水合作用。

4) 叠层石及凝块石白云岩由于与藻类的生长过程相关,因而发育一定数量的微孔(包括窗格孔和晶间孔等),渗透性较好,有可能成为潜在的储集岩,特别是对于深层天然气的勘探,值得给予足够重视。

参 考 文 献

- [1] Zenger D H, Dunham J B, Ethington R I. Concepts and models of dolomitization[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(2): 186–204.
- [2] Sun S Q. Dolomite reservoirs: porosity evolution and reservoir characteristics[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(2): 186–204.
- [3] 张学丰, 胡文瑄, 张军涛. 白云岩成因相关问题及主要形成模式[J]. 地质科技情报, 2006, 25(5): 32–40.
Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Juntao. Critical problems for dolomite formation and dolomitization models[J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(5): 32–40.
- [4] 陈子料, 寿建峰, 王少依, 等. 柴达木盆地西部地区第三系湖相藻灰岩油气藏及勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2004, 9(5): 59–66.
Chen Ziliao, Shou Jianfeng, Wang Shaoyi, et al. Tertiary lake algal limestone oil and gas reservoirs in western part of Qaidam Basin and exploration potential[J]. China Petroleum Exploration, 2004, 9(5): 59–66.
- [5] 孙岩, 沈安江, 徐洋, 等. 柴达木盆地跃进地区下干柴沟组上段藻丘灰岩储层特征[J]. 沉积学报, 2002, 20: 61–69.
Sun Yan, Shen Anjiang, Xu Yang, et al. A research on E32 algal-reef reservoir in Yuejin Area, Qaidam Basin, Northwestern China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20: 61–69.
- [6] 孔金平, 刘效曾. 塔里木盆地塔中5井下奥陶统隐藻类生物礁[J]. 新疆石油地质, 1998, 19: 221–224.
Sun Jinping, Liu Xiaozeng. Lower Ordovician crypto-algae organic reef in well TZ5 in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1998, 19: 221–224.
- [7] 欧阳睿, 焦存礼, 白利华, 等. 塔里木盆地塔中地区生物礁特征及分布[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 33–36.
Ouyang Rui, Jiao Cunli, Bai Lihua, et al. The distribution and features of reef in Tazhong area of Tarim Basin, Northwest China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2): 33–36.
- [8] 罗平, 张兴阳, 顾家裕, 等. 塔里木盆地奥陶系生物礁露头的地球物理特征[J]. 沉积学报, 2003, 21: 423–427.
Luo Ping, Zhang Xingyang, Gu Jiayu, et al. Geophysical characteristics of Ordovician reef outcrops in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21: 423–427.
- [9] 顾家裕, 张兴阳, 罗平, 等. 塔里木盆地奥陶系台地边缘生物礁、滩发育特征[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 277–283.
Gu Jiayu, Zhang Xingyang, Luo Ping, et al. Development characteristics of organic reef-bank complex on Ordovician carbonate platform margin in Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3): 277–283.
- [10] 李相明, 杨申谷. 巴楚地区中奥陶世生物礁造礁生物特征[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2006, (04): 25–27, 442.
Li Xiangming, Yang Kungu. Characteristics of Middle Ordovician organic reefs in Bachu Area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, (04): 2006, 25–27, 442.
- [11] 刘延莉, 樊太亮, 薛艳梅, 等. 塔里木盆地塔中地区、上奥陶统生物礁滩特征及储集体预测[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33: 562–565.
Liu Yanli, Fan Tailiang, Xue Yanmei, et al. Distribution of the Middle-Late Ordovician reef bank reservoir in Central Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33: 562–565.
- [12] 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.
- [13] Wright D T, Wacey D. Sedimentary dolomite: a reality check in the geometry and petrogenesis of dolomite hydrocarbon reservoirs[J]. Geological Society Special Publications, 2004, 235: 65–74.
- [14] Vasconcelos C, McKenzie J A, Warthmann R, et al. Calibration of the O18 paleothermometer for dolomite precipitated in microbial cultures and natural environments[J]. Geology, 2005, 33: 317–320.
- [15] Bontognali T, Vasconcelos C, Warthmann R J, et al. Microbes produce nanobacteria-like structures, avoiding cell entombment[J]. Geology, 2008, 36(8): 663–666.
- [16] Sánchez-Román M, Vasconcelos C, Schmid T. Aerobic microbial dolomite at the nanometer scale: implications for the geologic record[J]. Geology, 2008, 36(11): 879–882.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 于炳松, 董海良, 蒋宏忱, 等. 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[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 66–70.
Yu Bingsong, Dong Hailiang, Jiang Hongchen, et al. Discovery of spheric dolomite aggregations in Sediments from the bottom of Qinghai Lake and its significance for dolomite problem[J]. Geoscience, 2007, 21(1): 66–70.
- [20] Perri E, Tucker M. Bacterial fossils and microbial dolomite in Triassic stromatolites[J]. Geology, 2007, 35: 207–210.
- [21] 王小林, 胡文瑄, 陈琪, 等. 塔里木盆地柯坪地区上震旦统藻白云岩特征及其成因机理[J]. 地质学报, 2010, 84(10): 1479–1494.
Wang Xiaolin, Hu Wenxuan, Chen Qi, et al. Characteristics and formation mechanism of Upper Sinian algal dolomite at the Kalpin Area, Tarim Basin, NW China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(10): 1479–1494.

- [22] 贾承造. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律[J]. 新疆石油地质, 1999, (03): 3-9, 94.
Jia Chengzao. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, (03): 3-9, 94.
- [23] 金之钧, 王清晨. 中国典型叠合盆地与油气成藏研究新进展——以塔里木盆地为例[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34: 1-12.
Jin Zhijun, Wang Qingchen. Recent developments in study of the typical superimposed basins and petroleum accumulation in China: Exemplified by the Tarim Basin [J]. Science in China (Ser D), 2004, 47: 1-15.
- [24] Tuo J Philp R P. Occurrence and distribution of high molecular weight hydrocarbons in selected non-marine source rocks from the Liaohe, Qaidam and Tarim Basins, China [J]. Organic Geochemistry, 2003, 34: 1543-1558.
- [25] 张臣, 郑多明, 李江海. 柯坪断隆古生代的构造属性及其演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2001, (04): 314-318.
Zhang Chen, Zheng Duoming, Li Jianghai. Attribute of Paleozoic structures and its evolution characteristics in Keping fault-uplift [J]. Oil & Gas Geology, 2001, (04): 314-318.
- [26] 贾承造, 李本亮, 张兴阳, 等. 中国海相盆地的形成与演化[J]. 科学通报, 2007, 52: 1-8.
Jia Chengzao, Li Benliang, Zhang Xingyang, et al. Formation and evolution of the Chinese marine basins [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52: 1-11.
- [27] Kang Y, Kang Z. Tectonic evolution and oil and gas of Tarim basin [J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1996, 13 (3-5), 317-325.
- [28] 陈践发, 孙省利, 刘文汇. 塔里木盆地寒武统底部富有机质层段地球化学特征及成因探讨[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(增刊): 107-113.
Liu Jianfa, Sun Shengli, Liu Wenhui. Geochemical characteristics of organic matter-rich strata of lower Cambrian in Tarim Basin and its origin [J]. Science in China (D), 2004, 47(Suppl): 125-132.
- [29] 王福星, 曹建华, 江利登, 等. 岩溶洞穴叠层石[J]. 古生物学报, 1994, 33(2): 172-179.
Wang Fuxing, Cao Jianhua, Jiang Lideng. Cave stromatolites in karst area [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1994, 33(2): 172-179.
- [30] 戎昆方, 安裕国. 初论生物成因的洞穴叠层石的形成条件[J]. 中国岩溶, 1998, 17(3): 285-290.
Rong Kunfang, An Yuguo. Developed conditions of biogenic cave stromatolite [J]. Carsologica Sinica, 1998, 17(3): 285-290.
- [31] Kennard J M, James N P. Thrombolites and stromatolites: two distinct types of microbial structures [J]. Palaios, 1986, 1(5): 492-503.
- [32] Feldmann M, McKenzie J. A. Stromatolite-thrombolite associations in a modern environment, Lee Stocking Island, Bahamas [J]. Palaios, 1998, 13(2): 201-212.
- [33] Burne R V, Moore L S. Microbialites organosedimentary deposits of benthic microbial communities [J]. Palaios, 1987, 2(3): 241-254.
- [34] Turner E C, James N P, Narbonne G M. Taphonomic control on microstructure in early neoproterozoic reefal stromatolites and thrombolites [J]. Palaios, 2000, 15(2): 87-111.
- [35] Planavsky N, Ginsburg R N. Taphonomy of modern marine Bahamian microbialites [J]. Palaios, 2009, 24(1): 5-17.
- [36] Jahnert R J, Collins L B. Significance of subtidal microbial deposits in Shark Bay, Australia [J]. Marine Geology, 2011, 286(1-4): 106-111.
- [37] Feldmann M, McKenzie J. A. Messinian stromatolite-thrombolite associations, Santa Pola, SE Spain: an analogue for the palaeozoic? [J]. Sedimentology, 1997, 44: 893-914.
- [38] Riding R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms [J]. Sedimentology, 2000, 47 (Suppl. 1): 179-214.
- [39] 曹瑞骥, 袁训来. 叠层石 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社 2006: 48-51.
Cao Ruiji, Yuan Xunlai. Stromatolite [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press 2006: 48-51.
- [40] Baker P A, Kastner M. Constraints on the formation of sedimentary dolomite [J]. Science, 1981, 213 (4504): 214-216.
- [41] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1-3): 1-81.
- [42] Wright D T, Oren. Nonphotosynthetic bacteria and the formation of carbonates and evaporites through time [J]. Geomicrobiology Journal, 2005, 22(1-2): 27-53.
- [43] Qing H R, Bosence D W J, Rose E P F. Dolomitization by penesaline sea water in Early Jurassic peritidal platform carbonates, Gibraltar, western Mediterranean [J]. Sedimentology, 2001, 48(1): 153-163.
- [44] Melim L A, Scholle P A. Dolomitization of the Capitan Formation foreereef facies (Permian, West Texas and New Mexico): seepage reflux revisited [J]. Sedimentology, 2002, 49: 1207-1227.
- [45] Friedman G M. Dolomite is an evaporate mineral: evidence from the rock record and from sea-marginal ponds of the Red Sea. [J]. Special Publications, 1980, 28: 69-80.
- [46] Brady P V, Kaumhansl J L, Papenguth H W. Surface complexation clues to dolomite growth [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1996, 60: 727-731.
- [47] Roberts J, Bennett P C, González L A, et al. Microbial precipitation of dolomite in methanogenic groundwater [J]. Geology, 2004, 32: 277-280.
- [48] Moreira N F, Walter L M, Vasconcelos C, et al. Role of sulfide oxidation in dolomitization: Sediment and pore-water geochemistry of a modern hypersaline lagoon system [J]. Geology, 2004, 32: 701-704.
- [49] Sánchez-Román M, McKenzie J A, Wagener A de L R, et al. Presence of sulfater does not inhibit low-temperature dolomite precipitation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 285: 131-139.
- [50] Rudolph W W, Irmner G, Hefter G T. Raman spectroscopic investigation of speciation in MgSO_4 (aq) [J]. Phys. Chem. Chem. Phys., 2003, 5: 5253-5261.
- [51] Zhang F, Xu H, Konishi H, et al. Dissolved sulfide-catalyzed precipitation of disordered dolomite: Implications for the formation mechanism of sedimentary dolomite [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2012, 97: 148-165.
- [52] Zhang F, Xu H, Konishi H, et al. Polysaccharide-catalyzed nucleation and growth of disordered dolomite: A potential precursor of sedimentary dolomite [J]. American Mineralogist, 2012, 97: 556-567.
- [53] 寿建峰, 邵文斌, 沈安江. 柴西地区第三系藻灰(云)岩的岩石类型与分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 37-39.
Shou Jianfeng, Shao Wenbin, Shen Anjiang. Lithological types and distribution features of Tertiary algal-limestone in Chaixi Area, Qaidam Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(4): 37-39.