

塔里木盆地西北缘上震旦统微生物碳酸盐岩储层特征与成因

李朋威¹, 罗平², 陈敏³, 宋金民⁴, 金廷福⁴, 王果谦⁴

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 钢研纳克检测技术有限公司, 北京 100081; 4. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要:通过野外露头地质观察、薄片鉴定与孔渗分析等,详细研究了塔里木盆地西北缘什艾日克剖面上震旦统微生物碳酸盐岩岩石学和储层特征,并简要分析了储层成因。研究认为该区上震旦统微生物碳酸盐岩以微生物白云岩为主,约占整个上震旦统碳酸盐岩的70.37%。根据是否具有叠层构造,将该区上震旦统微生物岩划分为叠层石和非叠层石两大类型,其中,叠层石类包括层状叠层石、丘状叠层石和小型孤立柱状叠层石,并以层状叠层石为主,结构以纹层球粒、泥晶为特征;而非叠层石包括非叠层蓝细菌球粒岩和非叠层蓝细菌泡沫绵层岩,结构以球粒、泡沫绵层为特征。根据储集性,可将该区上震旦统微生物岩储层划分为上、下两段,上段储层要优于下段。层状叠层石和非叠层蓝细菌球粒、泡沫绵层白云岩为有利储集岩石类型。微生物结构、白云石化和溶蚀作用为微生物岩储层形成的有利因素,其中微生物结构是基础,决定着微生物岩储层的孔隙类型及其孔隙结构特征,而白云石化和溶蚀作用则为微生物岩储层有效孔隙形成的关键因素,上段储层较好更得益于表生岩溶作用的影响。

关键词:微生物,碳酸盐岩储层;上震旦统;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and origin of the Upper Sinian microbial carbonate reservoirs at the northwestern margin of Tarim Basin

Li Pengwei¹, Luo Ping², Chen Min³, Song Jinmin⁴, Jin Tingfu⁴, Wang Guoqian⁴

(1. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 3. NCS Testing Technology Co. Ltd., Beijing 100081, China; 4. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Through outcrop observation, thin section examination and physical property analysis, this paper studied the petrological and reservoir characteristics of the Upper Sinian microbial carbonates on the Shi Airike section at the northwestern margin of the Tarim Basin and briefly discussed the origin of the microbial carbonate reservoirs. The microbial carbonates are dominated by microbial dolomites, accounting for 70.37% of the whole Sinian carbonates. Based on having stromatolitic structure or not, the microbial carbonates are divided into stromatolites and non-stromatolites. The stromatolites include stratiform, domal and small isolate columnar types, with the stratiform stromatolites as the main type and pelletoid and micritic lamination as their texture characteristics. In contrast, the non-stromatolites include non-stromatolitic cyanobacterial pellet rock and cyanobacterial foam spongy rock, featuring in pelletoid and foam sponge textures. According to physical property, the Sinian microbial carbonate reservoir can be divided into two intervals, with the upper interval being better than the lower. Among the microbial carbonates, the stratiform stromatolites and non-stromatolitic cyanobacterial dolostones especially with foam sponge-like texture are the favorable reservoir rocks. The reservoirs are characterized by fenestral, pellet-associated, foam sponge-associated dissolved porosity as their main reservoir space. The formation and distribution of the microbial carbonate reservoirs are mainly controlled by microfabrics, dolomatization and dissolution. Of these influencing factors, the microfabrics is the fundamental factor determining the types of the pore space and their texture; the dolomatization and dissolution are the critical factors determining the formation of effective pore space. The higher quality of the upper microbial carbonate reservoirs is also attributed to the epigenetic karstification.

Key words: microbial, carbonate reservoir, Upper Sinian, Tarim Basin

收稿日期:2014-10-11; 修订日期:2015-03-15。

第一作者简介:李朋威(1983—),男,博士后,碳酸盐岩沉积与储层地质。E-mail:lipw_syky@sinopec.com。

基金项目:中国石油勘探开发研究院院级项目(101001CQ0B52139);中国石化石油勘探开发研究院院级项目(G5800-12-ZS-YK514003)。

微生物碳酸盐岩分布广泛,在时代上可以追溯到早太古代,并以中-新元古代、寒武纪和早奥陶世最为发育,中奥陶世以来其数量大量减少并常与后生物建造共同构成复合礁,或单独发育于生物大灭绝之后^[1-4]。因此,微生物碳酸盐岩主要发育于中奥陶世以前的古老地层中,且往往埋藏较深。作为一种特殊的岩石类型,微生物碳酸盐岩不仅具有重要的沉积学研究意义,同时也具有重要的工业价值。微生物碳酸盐岩能够形成重要的烃源岩和良好的油气储层^[4],在美国阿拉巴马州、东西伯利亚地区、巴西桑托斯盆地、阿曼盐盆地和哈萨克斯坦以及我国的四川盆地和渤海湾盆地等地都获得了大量赋存于微生物碳酸盐岩储层中的油气^[5-16]。微生物碳酸盐岩储层是过去油气勘探中较少关注的一类储层类型,这类储层因其特殊的岩石结构类型和潜在的油气勘探潜力而逐渐受到关注。

塔里木盆地微生物碳酸盐岩丰富且类型多样,并主要分布在上震旦统一奥陶统^[17]。通过野外露头 and 镜下观察,发现塔里木盆地上震旦统微生物岩以叠层石和具有多种蓝细菌结构的非叠层微生物岩为主,宏观特征较为单一;寒武系开始出现了巨观构造微生物礁,并出现了大量的凝块石以及表附菌、葛万菌等造礁微生物;奥陶系微生物岩则明显减少,以叠层石多见。在前期研究中,多位学者针对该区微生物岩的沉积与演化、成因等方面已经开展了较多的研究工作。朱诚顺等较早开展了塔里木盆地上震旦统微生物岩的研究,重点研究了叠层石的分布、产出层位、组合类型等,并用于地层对比与划分^[18-20];史基安等则研究上震旦统微生物白云岩结构及其成因,均认为其形成与微生物调节作用有关^[21-22];宋金民等就阿克苏露头区下寒武统微生物碳酸盐岩建造、演化与储层发育特征进行了研究^[23-25];胡文瑄等侧重塔里木盆地柯坪地区寒武系微生物白云岩特征、成因及意义进行了详细研究^[26];由雪莲等则研究了巴楚地区中-上寒武统叠层石白云岩中微生物矿化组构特征及其成因^[27];Riding对塔北、塔西南和塔中地区奥陶系微生物岩开展了钙化蓝细菌的研究,并侧重于蓝细菌类型与微生物群落的研究^[28-32]。

目前,塔里木盆地碳酸盐岩油气勘探主要侧重于下古生界^[33-35],而上震旦统油气勘探基本上处于起步阶段,还没有获得实质性的突破。宋立勋等结合钻井和部分地震资料对盆地区上震旦统分布特征及古地理概貌方面做了探索性研究工作^[36]。叶德胜等对塔北、塔东地区上震旦统白云岩岩石学、地球化学及储层特征进行了分析,认为藻白云岩为塔里木盆地上震旦统有利的储集岩石类型,并初步提出白云岩化模

式^[37-39]。张增耀等则结合新的地震资料进一步对盆地区震旦系的分布特征、沉积体系及构造格局等做了补充工作^[40]。何金有等针对震旦系顶部古岩溶风化壳及其油气勘探意义作了分析与阐述^[41]。在钻井过程中,目前只有塔东低凸起的塔东1井、塔东2井和塔北隆起沙4井、星火1井等钻遇上震旦统白云岩,且仅沙4井获得了工业油流;盆地中西部巴楚隆起区的塔参1井、方1井、和4井、同1井以及塔中地区中深1井虽钻遇震旦系但均未见到上震旦统白云岩。

总体上,有关该区上震旦统微生物岩相关的储层还未见报道,本文旨在从现代微生物储层研究的角度,通过野外露头地质观察与室内薄片鉴定,分析塔里木盆地西北缘上震旦统微生物岩岩石学和储层特征,以便查明有利的储集岩石类型及其结构特征,进而分析上震旦统微生物碳酸盐岩储层发育的主控因素,为塔里木盆地的深层油气勘探提供重要依据。

1 地质背景

塔里木盆地周边的震旦系集中出露于盆地西北缘的阿克苏-乌什地区、东北缘库鲁克塔格和西南缘铁克里克地区^[36,40]。其中,阿克苏-乌什地区的震旦系主要出露于阿克苏、乌什和柯坪之间的阿克苏-乌什县南山一带,分布在巧恩布拉克、尤尔美纳克、苏盖特布拉克、奇格布拉克及肖尔布拉克地区(图1a)。在构造上,该区位于柯坪断隆北端,南华系-震旦系发育较为齐全,研究程度较高,具有我国“扬子区”沉积特征(表1),同时也是我国研究前寒武系与寒武系界线的重点地区之一。

新元古代末期,受Rodinia超大陆裂解影响,塔里木板块周边开始裂解。南华纪-震旦纪期间,塔里木板块先后经历了大陆裂谷-半深海-滨浅海-广海碳酸盐岩台地等几个发展阶段。上震旦统奇格布拉克组为广海碳酸盐岩台地环境下沉积的中-厚层状白云岩,富含叠层石、核形石和微古植物化石^[18]。该组全区分布较稳定,沉积厚度141~195m,自东向西略有增厚^[42]。奇格布拉克组与下伏苏盖特布拉克组为整合接触,与上覆下寒武统玉尔吐斯组呈不整合接触,并有不同的表现形式,除塔中、塔北、塔东局部地区两者呈角度不整合关系外,盆地周边及内部大部分地区为平行不整合关系^[40-41]。

本文以什艾日克剖面上震旦统奇格布拉克组微生物白云岩为主要研究对象,重点探讨微生物白云岩类型及其储层发育特征。该区震旦系与寒武系呈平行不整合接触关系,上震旦统顶部为一套厚度约46m的古岩溶风化壳,顶部为一套垮塌角砾岩,可见变形构造和

溶蚀孔洞,下部可见清晰的叠层、似花边构造(剖面似花边而得名)以及大型洞穴等,洞穴内被针铁矿等暗色矿物所充填;风化壳下伏为一套厚度巨大、分布稳定的微生物白云岩。该剖面位于阿克苏市西南方向,距阿克苏市约14千米,邻近314国道,交通相对便利,是震旦系地层研究的首选剖面(图1b)。

2 微生物白云岩岩石学特征

微生物碳酸盐岩为塔里木盆地西北缘上震旦统碳酸盐岩中最主要的一类岩石类型,并以微生物白云岩为主,在露头 and 镜下均可见到广泛发育的微生物白云

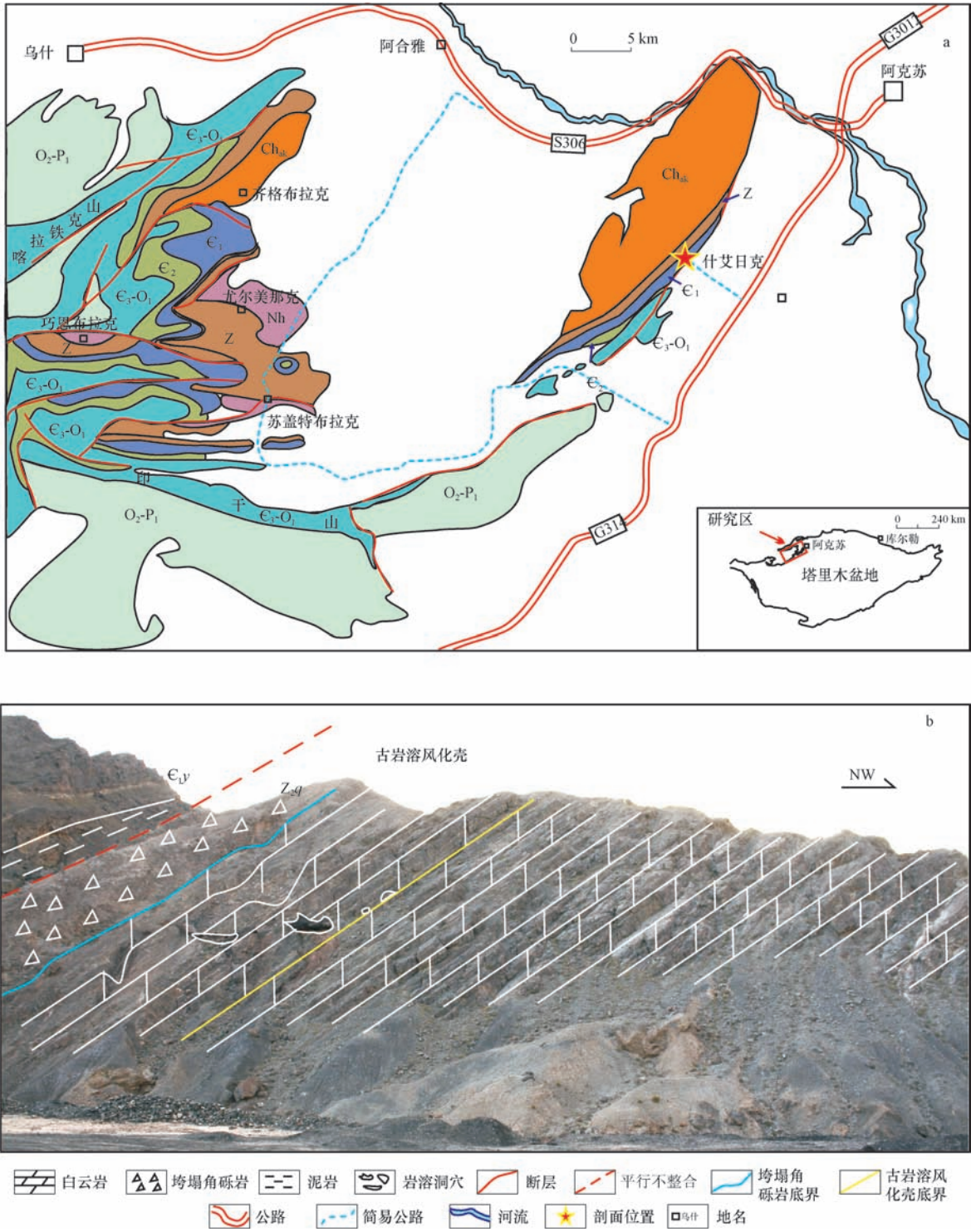


图1 塔里木盆地阿克苏-柯坪地区地质简图(a)与什艾日克露头剖面(b)^[37]

Fig.1 Geological map of Aksu-Keping area and outcrop of the Shiirike section, Tarim Basin^[37]
Chak. 长城系阿克苏群;Nh. 南华系;Z. 震旦系;Z_{2q}. 上震旦统奇格布拉克组;E₁. 下寒武统;E₂. 中寒武统;
E₃-O₁. 上寒武统一下奥陶统;O₂-P₁. 中寒武统一下二叠统

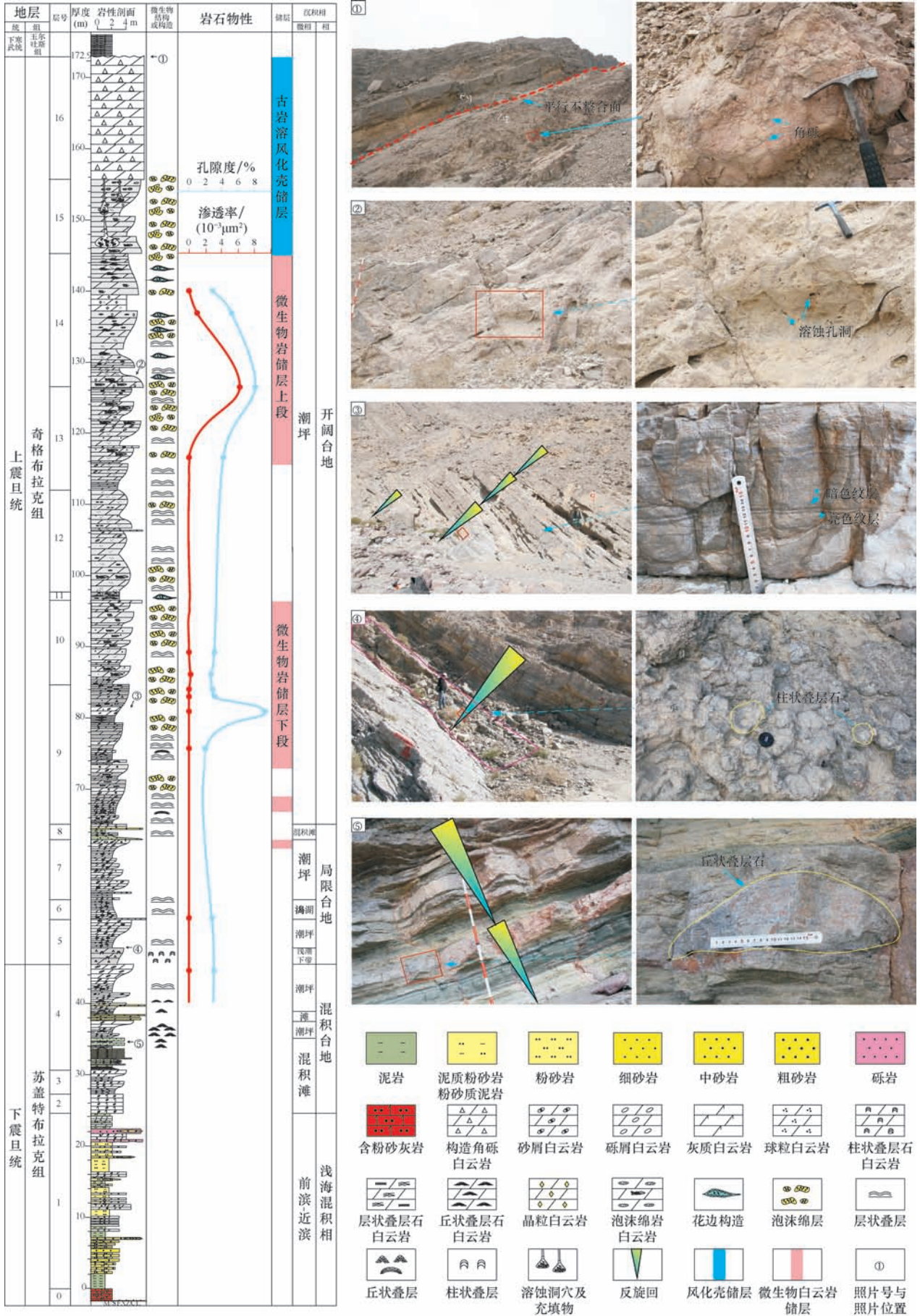


图3 塔里木盆地什艾日克剖面上震旦统岩性综合柱状图与露头特征

Fig. 2 The outcrop and lithologic section of the Sinian strata of the Shaiirike section, Tarim Basin

①古风化壳;②非叠层泡沫绵层岩体;③微生物岩旋回;④柱状叠层石层;⑤混积层系

是连续、断续状或杂乱状展布,局部可见窗格构造(图4h—i),窗格孔大多被亮晶白云石全充填或半充填。结构类型以泥晶、球粒和亮晶为主(图4d—i),泥晶或球粒往往构成层状叠层石的暗色纹层,亮层主要亮晶白云石组成。球粒一般近圆形或椭圆形,其直径大多小于0.3mm,边缘模糊,具有微生物球粒特征。叠层石的发育一般具有一定的韵律性,在露头表面,层状叠层石一般颜色呈深灰色,并常与浅灰色砂屑(鲕粒)或泡沫绵层白云岩间互发育,构成微生物岩沉积旋回(图3)。

镜下还可见到切穿纹层的高角度压溶缝以及沿纹层展布的水平压溶缝。这种压溶缝一般只发生于层状叠层石内,表明层状叠层石易于受到成岩压实作用的影响。

2.1.2 丘状叠层石

丘状叠层石在该区上震旦统不常见,主要发育于下震旦统苏盖特布拉克组顶部,多与碎屑岩以混积层系的形式产出(图3),亦可零稀见于上震旦统奇格布拉克组,约占整个剖面的1.26%。在露头表面,丘

状叠层石在地层中呈暗黑色丘状正凸起,与浅灰色围岩具有明显的颜色差别,其纹层呈半球形或箱状(图3)。塔里木盆地西北缘下震旦统苏盖特布拉克组广泛发育混积岩或混积层系,为超大陆板块裂解、拉张背景下从裂谷碎屑沉积体系向稳定的碳酸盐岩台地沉积体系转换过渡下的产物。王杰琼等对该区混积岩的类型进行了详细划分并阐述了其成因,认为该套混积岩为构造、环境和气候条件等共同作用下的产物^[45]。

通过镜下观察,发现丘状叠层石的结构类型与其形成的时期有关。早期混积层系内的丘状叠层石以纹层状的球粒结构为特征,纹层较为杂乱,断续分布(图4a),而晚期碳酸盐岩台地内的丘状叠层石不仅具有纹层的球粒结构,同时也出现了泡沫绵层结构,也开始出现了色球菌生物群落。

丘状叠层石在不同的沉积环境内表现出不同的沉积规律。在混积台地内,丘状叠层石常与碎屑岩呈韵律性沉积,随着碳酸盐岩增厚、变纯,丘状叠层石向层状叠层石转变;而在碳酸盐岩台地内,丘状叠层石一般

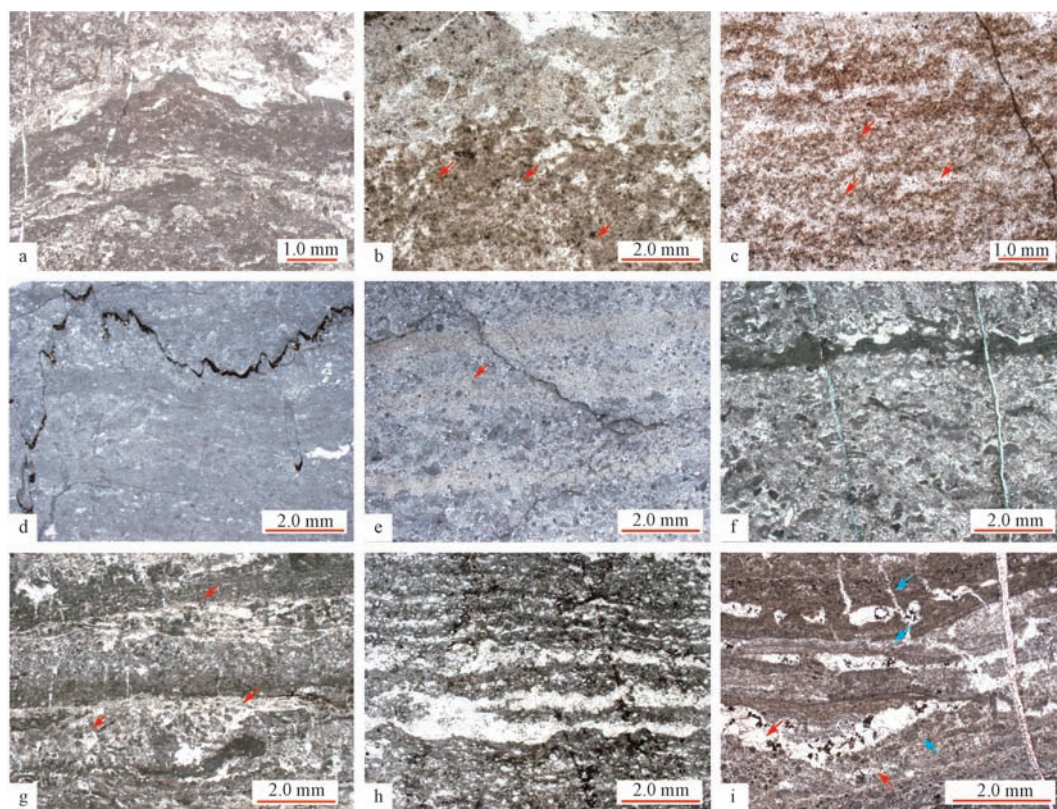


图4 塔里木盆地什艾日克剖面上震旦统叠层石白云岩特征

Fig. 4 Characteristics of the Upper Sinian stromatolite dolomites on the Shi Airike section, Tarim Basin

- a. 丘状叠层石含球粒泥晶白云岩,暗色泥晶纹层发育,但较杂乱, $Z_2q(4)$ 层,普通薄片(单);b. 柱状叠层石球粒泥晶白云岩,纹层较宽,厚约1~5mm,暗色纹层主要由球粒(红色箭头)、泥晶构成, $Z_2q(5)$ 层,普通薄片(单);c. 柱状叠层石球粒泥晶白云岩,暗色纹层由球粒(红色箭头)、泥晶组成,亮色纹层由亮晶白云石组成, $Z_2q(5)$ 层,普通薄片(单);d. 层状叠层石含砂屑泥晶白云岩,高角度压溶缝发育, $Z_2q(9)$ 层,普通薄片(单);e. 层状叠层石含球粒(砂屑)泥晶白云岩,压溶缝发育, $Z_2q(9)$ 层,普通薄片(单);f. 层状叠层石含球粒(砂屑)泥晶白云岩,可见水平压溶缝、张开裂缝, $Z_2q(9)$ 层,铸体薄片(单);g. 层状叠层石泥晶球粒白云岩,暗色纹层与亮色纹层呈渐变,泥晶、球粒(红色箭头)构成暗色纹层;h. 层状叠层石泥晶白云岩, $Z_2q(12)$ 层,普通薄片(单);i. 层状叠层石泥晶白云岩,纹层较杂乱,可见球粒(红色箭头),窗格孔发育(绿色箭头),半充填, $Z_2q(12)$ 层,普通薄片(单)

发育于碳酸盐岩沉积旋回的下部,代表一种相对较深的沉积产物。一般认为丘状叠层石形成于潮间带,因此,丘状叠层石与层状叠层石的韵律性沉积反映了潮间带与潮上带的频繁性交互变化。在混积台地内,陆源碎屑的加入从某种程度上抑制了微生物的形成,以形成孤立、规模较小的丘状生物建隆为主;而在清洁的碳酸盐岩台地内,在沉积水体相对较深的环境条件下,由于光线较弱,同样限制了微生物种群的发育,微生物群落为了寻求更多的阳光而形成丘状微生物建隆。

2.1.3 柱状叠层石

塔里木盆地上震旦统柱状叠层石分布较为局限,主要发育于上震旦统奇格布拉克组的底部(图3),且成层分布,厚约2~2.2 m,并在奇格布拉克至什艾日克一带分布稳定,横向具有可对比性,可作为震旦系上、下统分界限的鉴别标志。通过野外露头观察,柱状叠层石层由多层小型孤立柱状叠层石组成,形成于浅潮下带环境;柱状叠层石往往呈孤立状分布,彼此间未见连接但紧密相邻,露头表面呈凹凸不平的疙瘩状,横剖面可见同心圈层结构(图3);规模小,其直径一般只有10~15 cm,柱体高大,多为20~30 cm。

柱状叠层石白云岩以球粒结构为特征(图4b,c),且球粒往往构成叠层石的暗色或深灰色纹层,纹层厚度不一,一般为1~5 mm,亮色纹层由一般亮晶白云石构成,厚约0.5~5 mm。

2.2 非叠层蓝细菌白云岩

非叠层蓝细菌白云岩,指不具有明显的叠层构造的一类微生物岩类型。在塔里木盆地,上震旦统非叠层蓝细菌白云岩不同于寒武系常见凝块石和树枝石等微生物岩类型,具有其独特性。这类岩石独特性在于露头表面几乎看不到明显的微生物岩宏观特征,但镜下可见球粒和泡沫绵层结构等微生物结构特征。除此之外,还可见到一些具有包覆结构的核形石等。因此,非叠层蓝细菌白云岩在露头表面往往难以识别,尤其具有泡沫绵层结构蓝细菌白云岩往往被误认为砂屑白云岩。

2.2.1 非叠层蓝细菌球粒白云岩

非叠层蓝细菌球粒岩是指具有蓝细菌球粒结构但不具有叠层构造的一类非叠层类微生物岩。它与叠层石蓝细菌球粒岩的不同之处在于前者球粒呈分散分布,且不构成暗色纹层(图5a,b)。非叠层蓝细菌球粒白云岩在什艾日克剖面上震旦统相对不常见,仅占整个碳酸盐岩的6.57%,且主要发育于奇格布拉克组中部。

2.2.2 非叠层蓝细菌泡沫绵层白云岩

非叠层蓝细菌泡沫绵层岩是指具有蓝细菌泡沫绵

层结构的一类非叠层类微生物岩。这类岩石为该区内震旦统最为发育的一类微生物岩,主要发育于上震旦统奇格布拉克组中上部,约占整个上震旦统碳酸盐岩的34.02%。镜下观察发现,泡沫绵层形态多样,可见不规则状、蜂窝状和花边状等形态。镜下可见泡沫绵层与砂砾屑共生,表明泡沫绵层微生物岩可能形成于水动力条件相对较强的潮坪环境。

不规则状或蜂窝状泡沫绵层为该区内震旦统非叠层微生物白云岩最常见的泡沫绵层结构类型。不规则状泡沫绵层往往彼此之间相互连接构成网络状,绵层腔长轴直径相对较大,一般分布在0.5~1.5 mm(图5d);蜂窝状泡沫绵层个体往往独立分布,且相对较小,但较均一,长轴直径为0.25~1 mm(图5e,f,h);泡沫绵层边缘可因强烈的泥晶化作用而呈暗黑色(图5e)。泡沫绵层白云岩内还可见微生物席,并与泡沫绵层间互发育(图5e,f)。目前针对微生物席的定义具有多重性,尚未统一的答案^[46],早期学者强调微生物席是一个纹层状的微生物群落^[47-48],从“席”的字面含义,本文更支持这一观点,微生物岩中暗色线状沉积物为纹层状微生物群落遗迹的典型代表。此种岩类的另一个特点就是泡沫绵层腔极其发育,但绵层腔大多已被纤维状和粒状白云石充填。

花边状泡沫绵层边缘由两层到数层亮暗相间的同心纹层构成,似花边,且泡沫绵层腔较大,呈椭圆形或长条状,长轴直径最大可达7.5 mm,但腔内常常被多期次、多世代的白云石充填,可见残留孔或晶间溶孔(图5g)。这种现象曾被称为“葡萄花边构造”,在四川盆地上震旦统尤为发育,并认为是灯影组主要的储气构造^[49];王兴志等将与这种构造相关的孔洞称为“葡萄花边洞”,常出现于杂色白云质岩溶角砾岩和各种产状的溶缝之中^[13];向芳等均证明这是表生岩溶作用的产物,并可作为表生溶蚀作用的标志^[50-51];方少仙等认为这种构造是由先前形成的溶蚀溶洞被若干世代的非叠层石生态系兰细菌和白色纤维状亮晶白云石环洞壁交替充填而成^[52]。相对四川盆地上震旦统灯影组,这类结构或构造在塔里木盆地上震旦统地层中并不常见,分布较局限,主要分布于微生物白云岩储层二段顶部(图3)。考虑到其也为微生物作用下的产物,具有类似的绵层腔,暂将其归为泡沫绵层类,但这种结构为次生成因,镜下常见其与原生泡沫绵层或球粒共生。

3 微生物白云岩储层特征

3.1 储层划分

根据野外露头与镜下观察,并结合微生物岩物性

分析,将该区上震旦统奇格布拉克组微生物白云岩储层划分为上、下两段(图3)。

微生物岩储层上、下段厚度分别为29.3 m和24 m,其中储层上段位于古岩溶风化壳之下,紧邻古岩溶风化壳。两段储层物性存在较大差别,其中储层下段孔隙度较小,一般分布在2.0%~3.2%,渗透率很低,一般小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;储层上段孔隙度相对较大,一般分布在2.9%~8.1%,且渗透率也较高,一般大于

$1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。因此,相比较而言,储层上段的储集性能要优于储层下段(图6)。

3.2 孔隙类型

研究区上震旦统奇格布拉克组微生物白云岩储集空间类型多样,以发育窗格孔、球粒相关溶蚀孔、泡沫绵层腔内溶孔、泡沫绵层腔铸模孔、泡沫绵层腔超大溶孔以及晶间与晶间溶孔等为特征。

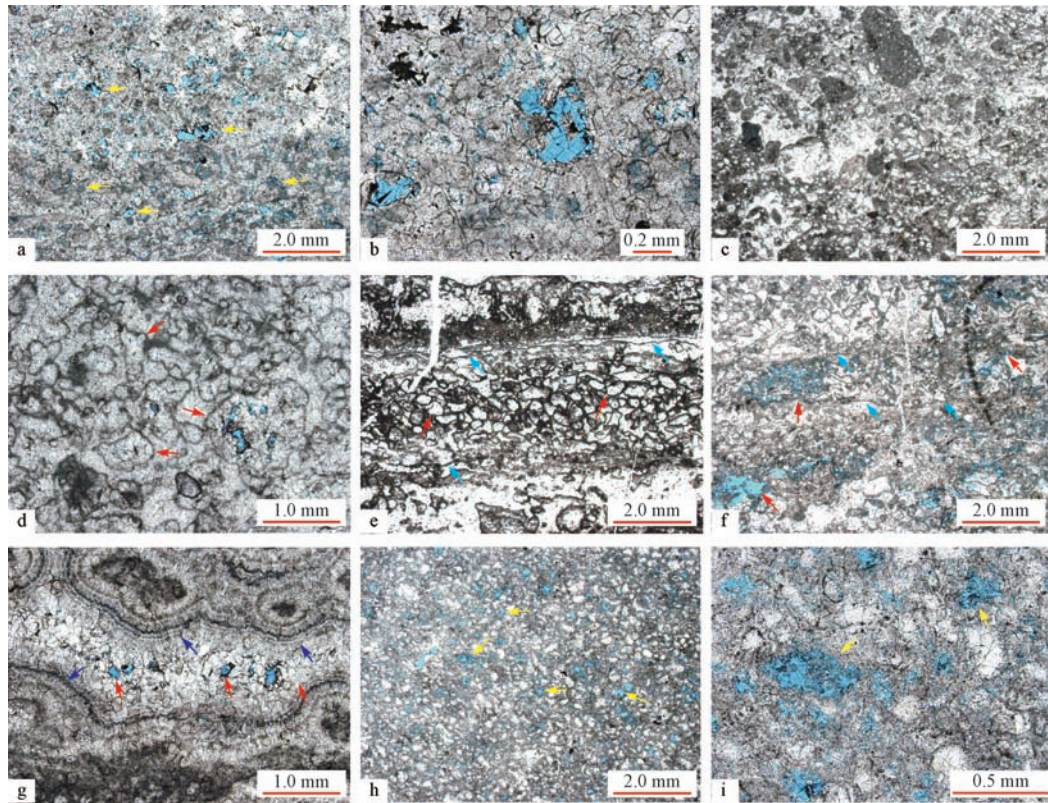


图5 塔里木盆地什艾日克剖面上震旦统非叠层蓝细菌白云岩储层特征

Fig. 5 Characteristics of the Upper Sinian non-stromatolitic cyanobacterial reservoirs on the Shi Airike section, Tarim Basin

a. 泥粉晶球粒白云岩,球粒相关溶孔发育(黄色箭头),面孔率约6%, Z_2q (9层),铸体薄片(单);b. 同a,局部放大;c. 含砂砾屑泡沫绵层白云岩, Z_2q (10层),普通薄片(单);d. 网络状泡沫绵层粉晶白云岩,绵层腔极其发育(红色箭头),腔内多被亮晶白云石充填,可见腔内晶间溶孔, Z_2q (12层),铸体薄片(单);e. 蜂窝状泡沫绵层泥粉晶白云岩,泡沫绵层(红色箭头)极其发育,可见球粒,微生物席(绿色箭头)等,泡沫绵层边缘泥晶化严重, Z_2q (12层),铸体薄片(单);f. 蜂窝状泡沫绵层泥粉晶白云岩,超大溶孔发育(红色箭头),面孔率约15%, Z_2q (13层),铸体薄片(单);g. 花边状泡沫绵层泥粉晶白云岩,绵层腔先后被栉节状、粒状白云石充填,花边构造明显(蓝色箭头),腔内可见晶间与晶间溶孔(红色箭头), Z_2q (14层),铸体薄片(单);h. 蜂窝状泡沫绵层泥粉晶白云岩,绵层腔内溶孔、铸模孔极其发育(黄色箭头),面孔率约13%, Z_2q (14层),铸体薄片(单);i. 同h,局部放大

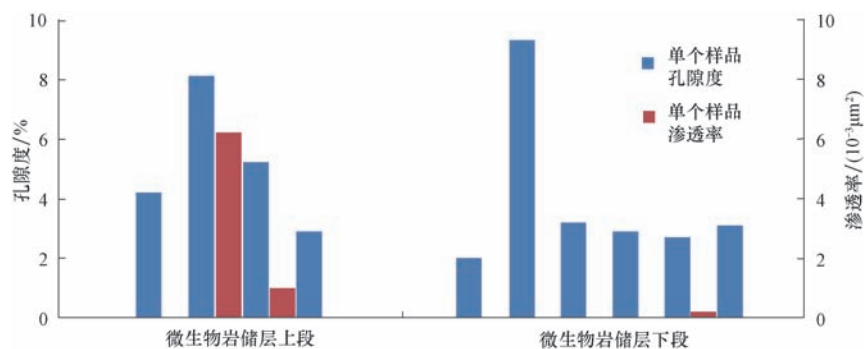


图6 塔里木盆地什艾日克剖面上震旦统不同微生物岩储层段物性特征

Fig. 6 Physical properties of different intervals in the Upper Sinian microbial carbonate reservoir on the Shi Airike section, Tarim Basin

3.2.1 窗格孔

窗格孔一般认为是碳酸盐岩沉积早期形成的原生孔隙,但目前大多已被亮晶方解石或白云石所充填或半充填,局部存在残留晶间孔。未充填完全的窗格孔可作为一种储集空间,并且这类孔隙可在适当的条件下,如埋藏溶蚀作用下发生选择性溶蚀作用而形成有利的储集空间。窗格孔在该区上震旦统奇格布拉克组中上部较为常见,并主要发育于层状叠层石的亮色纹层内(图4i)。

3.2.2 球粒相关溶蚀孔

球粒相关溶蚀孔是指与球粒溶蚀相关的溶蚀孔隙。这类孔隙一般与球粒的分布有关,并主要分布在球粒相对集中的部位,且分布在球粒周边,其大小、形状都与球粒相似(图5a,b),直径一般小于0.3mm。由蓝细菌形成的球粒有机质含量相对较高,在埋藏成岩过程中随着温度的升高会生成酸性物质,从而对周边物质,尤其是白云石结晶较粗的有利部位进行选择性的溶蚀,往往可以看到白云石溶蚀残余(图5b)。因此,这种溶蚀孔隙的形成可能为埋藏成岩环境下溶蚀作用的结果。这类孔隙分布较为广泛,为塔里木盆地上震旦统微生物白云岩储层重要的储集空间之一。

3.2.3 泡沫绵层腔内容蚀孔

泡沫绵层腔内容蚀孔是指泡沫绵层腔内容蚀孔隙,并主要以腔内晶间溶孔的形式出现,泡沫绵层腔未被完全溶蚀,可见泡沫绵层腔残余。这类孔隙一般见于网络状泡沫绵层白云岩内,镜下虽然常见,但溶蚀一般很不彻底,彼此间缺乏连通性(图5d),因此认为是塔里木盆地上震旦统微生物白云岩储层次要的储集空间。其形成类似于球粒相关溶蚀孔,形成于埋藏溶蚀作用。

3.2.4 泡沫绵层腔铸模孔

泡沫绵层腔铸模孔是指泡沫绵层腔被完全溶蚀后所产生的孔隙,仅保留了泡沫绵层腔的形状或泡沫绵层腔的边缘。这类孔隙一般出现于蜂窝状泡沫绵层腔内,且极其发育(图5h,i),大小和形状类似绵层腔,但这类孔隙连通性较差,多被泡沫绵层腔边缘所隔挡,其面孔率约为13%,为塔里木盆地上震旦统微生物白云岩储层中较好的储集空间。其形成类似于泡沫绵层腔内容孔,主要形成于埋藏溶蚀作用,只是溶蚀得更加彻底。

3.2.5 泡沫绵层腔超大溶孔

泡沫绵层腔超大溶孔是指溶蚀孔隙大于泡沫绵层

腔本身的一类储集空间。这类孔隙主要分布于微生物岩储层上段,临近古岩溶风化壳储层(图3),大多为泡沫绵层腔溶蚀后,被进一步溶蚀而成,“花边状泡沫绵层腔”的发育表明该段受过表生岩溶作用的影响。通过分析,认为这类孔隙的形成是埋藏溶蚀作用与表生岩溶作用共同作用的结果,早期埋藏岩溶作用形成的泡沫绵层腔内容孔或泡沫绵层腔铸模孔后期又经历了表生岩溶作用的影响而形成这种超大溶蚀孔隙。同时,镜下观察可发现这类溶孔会受到微生物席的约束而主要分布于微生物席之间(图5f)。这类孔隙发育相对广泛,为塔里木盆地上震旦统微生物白云岩储层重要的储集空间。

3.2.6 其他孔隙

除了以上与微生物结构相关的孔隙之外,还存在晶间与晶间溶孔、压溶缝以及张开裂缝等。这类孔隙一般发育相对有限,为次要的储集空间。

3.3 储集层物性与微生物结构

总体而言,微生物白云岩储层的孔隙度一般分布在3.0%~8.0%,最大可达9.3%,而渗透率较低,一般小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大可达 $6.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。从铸体薄片也可以看出,微生物白云岩储层的孔隙之间连通性均较差,因此,这类储层属于中孔特低渗透层。

通过镜下观察与统计,该区上震旦统微生物岩中柱状叠层石和丘状叠层石孔隙基本不发育,层状叠层石和非叠层蓝细菌白云岩则为较有利的储集岩石类型。不同类型的微生物岩的物性差别较大(图7,图8)。其中,非叠层泡沫绵层白云岩物性最好,其孔隙度为3.0%~9.3%,呈正态分布,渗透率小于 $6.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;其次为非叠层球粒白云岩,其孔隙度为2.9%~3.0%,渗透率很低,小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;叠层石球粒白云岩物性最差,为2.0%~2.9%,而渗透率小于 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。因此,微生物白云岩储层物性与微生物岩结构关系密切。相比较而言,泡沫绵层结构最有利于储集空间的形成。

4 微生物白云岩储层主控因素

概括起来,微生物白云岩储层的主要受以下几个因素的控制,它们分别是埋藏压实与胶结作用、微生物结构、白云石化与溶蚀作用。其中埋藏压实与胶结作用为微生物岩储层的破坏性因素,而微生物结构、白云石化和溶蚀作用为微生物白云岩储层形成的有利因素。

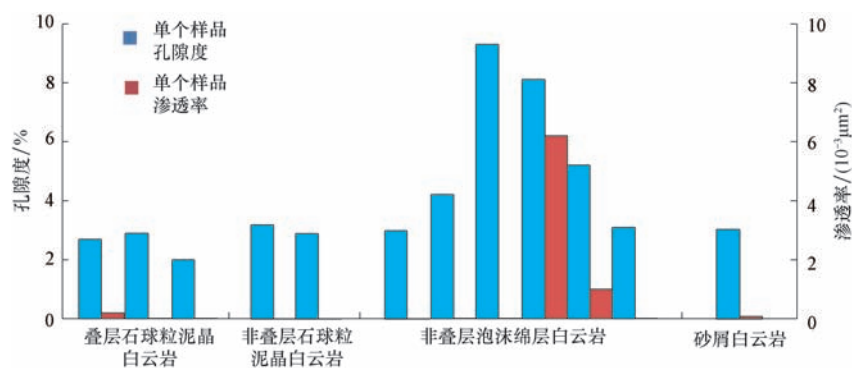


图7 塔里木盆地什艾日克剖面上震旦统储集岩石物性特征

Fig. 7 Physical properties of each type of the Upper Sinian microbial carbonate reservoir rocks on the Shiairike section, Tarim Basin

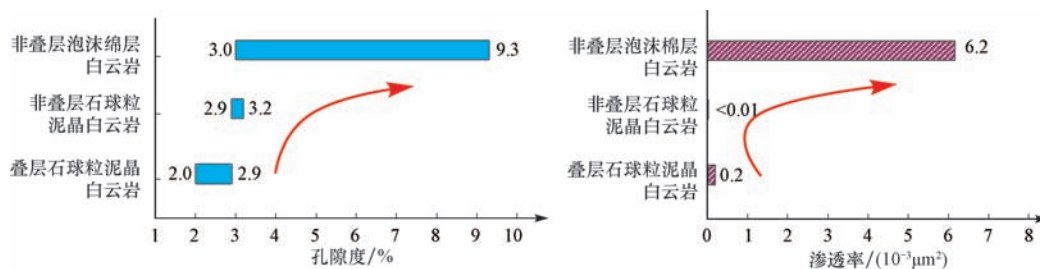


图8 塔里木盆地微生物结构与储集层物性关系

Fig. 8 Relationship between microbial structure and physical properties, Tarim Basin

4.1 埋藏压实与胶结作用

层状叠层石内可见较多压溶缝发育,既有平行于纹层的压溶缝,也有切穿纹层的高角度压溶缝,这表明该区上震旦统地层曾受到强烈的压实作用。沉积期或准同生期形成的窗格孔以及泡沫绵层腔大多已被亮晶白云石胶结充填。以上现象表明早期形成的原生孔隙在后期埋藏压实与胶结过程中被大大破坏。

4.2 微生物结构

微生物结构对该类储层的控制主要表现在以下3个方面:①微生物结构决定了该类储层孔隙类型及其结构特征。具有亮暗纹层相间的层状叠层石以发育窗格孔为特征,并主要分布于亮色纹层内;非叠层球粒蓝细菌白云岩主要发育于球粒相对集中的区域,其溶蚀孔隙形状和大小与球粒类似,而非叠层蓝细菌泡沫绵白云岩的孔隙一般分布于泡沫绵层腔内及其周边,以泡沫绵层腔内溶孔、铸模孔和超大溶孔为特征。②微生物结构对孔隙的保存作用。微生物碳酸盐岩一般成岩较早,在沉积早期就已经固结成岩,因此具有相对坚硬的微生物格架并有利于孔隙的保存。③白云石化和溶蚀作用的结构选择性。一般来说,与微生物球粒或泡沫绵层腔相关的白云石结晶较粗,尤其泡沫绵层腔内白云石结晶相对较粗,而结晶较粗的白云石更有利于晶间孔和溶蚀孔隙的形成。

4.3 白云石化作用

前已表述,微生物岩白云石化作用具有结构选择性,白云石晶粒较粗的部位晶间孔与晶间溶孔更加发育。大量的薄片鉴定表明,泡沫绵层边缘往往由泥晶白云岩组成,而绵层腔内大多由结晶相对粗大的纤状、粒状白云石组成,其腔内晶间孔与晶间溶蚀相对发育,这也是泡沫绵层白云岩储层物性相对较好的一个重要因素。

4.4 溶蚀作用

溶蚀作用对微生物白云岩储层的形成至关重要,因为这类储层储集空间的形成大多与溶蚀作用有关,溶蚀作用大大改善了其储集性能。通过分析认为,这里的溶蚀作用主要包括埋藏溶蚀和表生岩溶作用。微生物结构(球粒和泡沫绵层等)本身有机质含量相对较高,在埋藏成岩过程中随着埋藏深度增加、温度升高会产生有机酸和CO₂等腐蚀性酸性物质,从而对周边物质进行溶蚀而生成溶蚀孔隙,远离古岩溶风化壳的溶蚀孔隙的形成大多与埋藏溶蚀作用有关。而在微生物岩储层上段中上部由于受到表生岩溶作用的影响而形成很多超大溶蚀孔隙,从而进一步改善了微生物岩的储集物性,其孔隙度和渗透率均出现了明显的增大趋势,因此,该段储层的形成是在埋藏溶蚀作用的基础上叠加了表生岩溶作用的结果。

因此,有利于微生物白云岩储层形成的有利因素主要有3个:微生物结构、白云石化与溶蚀作用,其中,微生物结构是基础,决定了微生物岩储层的孔隙类型及其分布特征,并为白云石化和溶蚀作用提供了有利条件,而后期的白云石化和溶蚀作用是对这类储层的一种叠加改造,对储层的储集能力往往起着决定性作用。

5 结论

1) 塔里木盆地西北缘上震旦统微生物碳酸盐岩以发育层状叠层石、柱状叠层石、丘状叠层石、非叠层蓝细菌球粒岩和非叠层泡沫绵层岩为特征。

2) 微生物白云岩储层可作为该区上震旦统重要的一类储层类型,可将其划分为上、下两段,上段要优于下段。层状叠层石和非叠层蓝细菌白云岩,尤其是非叠层蓝细菌泡沫绵层白云岩为主要储集岩石类型。

3) 微生物白云岩储层储集空间以发育窗格孔、球粒相关溶蚀孔、泡沫绵层腔内溶蚀孔、泡沫绵层腔铸模孔、超大溶孔以及晶间和晶间溶孔等为特征。

4) 该区上震旦统微生物白云岩储层为中孔低渗透层,其孔隙度一般为3.0%~8.0%,而渗透率一般小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

5) 埋藏压实与胶结作用为微生物白云岩岩储层形成的主要破坏性因素,而微生物结构、白云石化和溶蚀作用为储层形成的建设性因素。其中,微生物结构决定了储层的储集空间类型与孔隙结构特征,并为白云石化和溶蚀作用的发生提供了有利的条件;白云石化和溶蚀作用是其储集空间形成的关键因素,决定了其储集性能,微生物岩储层上段较好得益于表生岩溶作用的影响。

致谢:薄片观察与鉴定过程中得到了中国石油勘探开发研究院杨式升高工的指导以及实验中心罗忠、周川闽的帮助,野外地质考察工作由王鑫、陆朋朋等协助完成,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] Riding R. Microbial carbonates; the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms[J]. *Sedimentology*, 2000, 47 (Suppl. 1): 179-214.
- [2] James N P, Dalrymple R W. Facies and models[M]. Library and Archives Canada Cataloguing in Publication, Geological Association of Canada, 2010.
- [3] 杨浩,王永标,陈林,等. 地球微生物过程与潜在烃源岩的形成: 钙质微生物岩[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2007, 32 (6): 797-802.
- [4] 李朋威,金廷福,王果谦,等. 微生物碳酸盐岩及其油气勘探意义[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(3): 66-74.
- [5] Li Pengwei, Jin Tingfu, Wang Guoqian, et al. Microbial carbonates and their significance in the petroleum exploration[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(3): 66-74.
- [6] 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.
- [7] Mancini E A, Llina's J C, Parcell W C, et al. Upper Jurassic thrombolite reservoir play, northeastern Gulf of Mexico[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(11): 1573-1602.
- [8] 李国玉. 从东西伯利亚古老地层看中国震旦系含油气前景[J]. *海相油气地质*, 2006, 11(3): 1-3.
- [9] Li Guoyu. The petroleum prospects of the Sinian system in China speculated from the Eastern Siberian old strata[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2006, 11(3): 1-3.
- [10] Wright P V, Racey A. Pre-salt microbial carbonate reservoirs of the Santos Basin, offshore Brazil[C]. AAPG Annual Convention and Exhibition, Colorado Convention Center, 2009.
- [11] Grotzinger J P, Amthor J E. Facies and reservoir architecture of isolated microbial carbonate platforms, terminal Proterozoic-early Cambrian Ara Group, South Oman Salt Basin[C]. AAPG Annual Meeting, Houston, Texas, 2002.
- [12] Schröder S, Grotzinger J P, Amthor J E, et al. Carbonate deposition and hydrocarbon reservoir development at the Precambrian-Cambrian boundary: The Ara Group in South Oman[J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 180: 1-28.
- [13] Kenter J A M, Harris P M M, Porta G D, et al. Microbial and cement boundstone-dominated flanks (and reservoirs) of an isolated carbonate platform[C]. AAPG Annual Convention, Dallas, Texas, 2004.
- [14] Kenter J A M, Harris P M M, Porta G D. Steep microbial boundstone-dominated platform margins-examples and implications[J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 178: 5-30.
- [15] 王兴志,侯方浩,黄继祥,等. 四川资阳地区灯影组储层的形成与演化[J]. *矿物岩石*, 1997, 17(2): 55-60.
- [16] Wang Xingzhi, Hou Fanghao, Huang Jixiang, et al. The formation and evolution of reservoir in Sinian Dengying Formation, Ziyang Area, Sichuan Basin[J]. *Journal of Mineral Petrology*, 1997, 17(2): 55-60.
- [17] 王兴志,刘仲宣. 影响四川资阳地区震旦系灯影组储集空间的主要因素[M]. 沉积学及岩相古地理学研究进展. 石油工业出版社, 1995.
- [18] Wang Xingzhi, Liu Zhongxuan. Influencing factors of the reservoir pore space in Sinian Dengying Formation, Ziyang area, Sichuan[M]. Progress of Sedimentology and Lithofacies paleogeography, Petroleum Industrial Press, 1995.
- [19] 余家仁,樊哲仁. 任丘古潜山油田碳酸盐岩储层研究[J]. *石油学报*, 1981, 2(1): 57-70.
- [20] Yu Jiaren, Fan Zheren. A study on the carbonate reservoir rocks of Renqiu Buried-hill oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1981, 2(1): 57-70.

Yang H, Wang Y B, Chen L, et al. Calci-Microbialite as a kind of

- [16] 余家仁,雷怀玉,刘趁花.试论海相碳酸盐岩储层发育的影响因素——以任丘油田雾迷山组为例[J].海相油气地质,1998,3(1):39-48.
Yu Jiaren,Lei Huaiyu,Liu Zhenhua. A discussion of factors influencing marine carbonate reservoir development: A case study of Wumishan Formation of Renqiu Oilfield[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 1998,3(1):39-48.
- [17] 罗平,王石,李朋威,等.微生物碳酸盐岩油气储层研究现状与展望[J].沉积学报,2013,31(5):807-823.
Luo Ping, Wang Shi, Li Pengwei, et al. Review and prospectives of microbial carbonate reservoirs[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5):807-823.
- [18] 高振家,王务严,李永安,等.新疆阿克苏-乌什震旦系[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1985.
Gao Zhenjia, Wang Wushi, Li Yong'an, et al. The Sinian of Aksu-Wushi, Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang People's Press, 1985.
- [19] 高振家,王务严,彭昌文,等.新疆震旦系[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1985.
Gao Zhenjia, Wang Wuyan, Peng Cangwen, et al. The Sinian system in Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang People's Press, 1985.
- [20] 高振家,朱诚顺.新疆前寒武纪地质[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1984.
Gao Zhenjia, Zhu Chengshun. The Precambrian, Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang People's Press, 1984.
- [21] 史基安.塔里木盆地西北缘震旦系和古生代白云岩成因及其储集性[J].沉积学报,1993,11(2):43-50.
Shi Ji'an. The origin of dolostone and its reservoir characteristics of Sinian and Palaeozoic, northwestern margin of Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1993, 11(2):43-50.
- [22] 王小林,胡文暄,陈奇,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.
- [23] 宋金民,罗平,杨式升,等.塔里木盆地苏盖特布拉克地区下寒武统肖尔布拉克组碳酸盐岩微生物建造特征[J].古地理学报,2012,14(3):341-354.
Song Jinmin, Luo Ping, Yang Shisheng et al. Carbonate rock microbial construction of the Lower Cambrian Xiaerblak Formation in Sugaitblak area, Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(3):341-354.
- [24] 宋金民,罗平,杨式升,等.苏盖特布拉克地区下寒武统微生物礁演化特征[J].新疆石油地质,2012,33(6):668-671.
Song Jinmin, Luo Ping, Yang Shisheng, et al. Evolution characteristics of microbial reef of Lower Cambrian in Sugaitblak area, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(6):668-671.
- [25] 宋金民,罗平,杨式升,等.塔里木盆地寒武统微生物碳酸盐岩储集层特征[J].石油勘探与开发,2014,41(4):404-437.
Song Jinmin, Luo Ping, Yang Shisheng, et al. Reservoirs of Lower Cambrian microbial carbonates, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4):404-437.
- [26] 胡文瑄,朱井泉,王小林等.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[J].石油与天然气地质,2014,35(6):860-869.
Hu Wenxuan, Zhu Jingquan, Wang Xiaolin et al. Characteristics, origin and geological implications of the Cambrian microbial dolomite in Keping area, Tarim Basin. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6):860-869.
- [27] 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(中国地质大学(北京);北京大学),2011,18(4):52-64.
You Xuelian, Sun Shu, Zhu Jingquan et al. Progress in the study of microbial dolomite model[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences (Beijing); Peking University), 2011, 18(4):52-64.
- [28] Riding, R. and Fan J. Ordovician calcified algae and cyanobacteria, northern Tarim Basin subsurface, China. Palaeontology, 2001, 44(3):783-810.
- [29] 范嘉松,吴亚生.从塔北隆起奥陶纪钙藻化石探讨奥陶纪的古环境[J].微体古生物学报,2004,21(3):251-266.
Fan Jiasong, Wu Yasheng. Palaeoenvironmental analysis of Ordovician rocks in the northern uplift of Tarim Basin in terms of calcareous algae and cyanobacteria[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2004, 21(3):251-266.
- [30] 王建波,李越,张园园,等.新疆巴楚晚奥陶世礁丘中的蓝菌群落[J].微体古生物学报,2009,26(2):139-147.
Wang Jianbo, Li Yue, Zhang Yuanyuan, et al. Cyanobacterial community from the reef mound of the Lianglitag Formation (Upper Ordovician), Bachu, Xinjiang, NW China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2009, 26(2):139-147.
- [31] 杨海军,王建波,黄智斌,等.塔中隆起上奥陶统凯迪阶良里塔格组生物群及其古生态特征[J].古生物学报,2009,8(1):109-122.
Yang Haijun, Wang Jianbo, Huangzhibin et al. Biota and Palaeoecology of the Lianglitag Formation (Katian, Upper Ordovician), Central Tarim, NW China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2009, 48(1):109-122.
- [32] 刘丽静,杨芝林,吴亚生.新疆塔里木盆地塔中地区上奥陶统良里塔格组钙化蓝细菌化石[J].古生物学报,2011,50(4):492-510.
Liu Lijing, Yang Zhilin, Wu Yasheng. Calcified cyanobacteria from the Upper Ordovician Lianglitag Formation, Central Tarim Basin, Xinjiang[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2011, 50(4):492-510.
- [33] 漆立新.塔里木盆地古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J].石油与天然气地质,2014,35(6):771-779.
Qi Lixin. Exploration practice and prospects of giant carbonate field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6):771-779.
- [34] 黄太柱,蒋华山,马庆佑.塔里木盆地古生界碳酸盐岩油气成藏特征[J].石油与天然气地质,2014,35(6):780-787.
Huang Taizhu, Jiang Huashan, Ma Qingyou. Hydrocarbon accumulation characteristics in Lower Paleozoic Carbonate reservoirs of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6):780-787.
- [35] 郑孟林,王毅,金之钧,等.塔里木盆地叠合演化与油气聚集[J].石油与天然气地质,2014,35(6):925-934.
Zheng Menglin, Wang Yi, Jin Zhijun, et al. Superimposition, evolution and petroleum accumulation of Tarim Basin. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6):925-934.
- [36] 宋立勋,刘万祥.塔里木盆地震旦纪古地理概貌[J].新疆石油地质,1990,11(3):199-203.
Song L Y, Liu W X. Central appearance of Sinian Palaeogeography of Tarim platform[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1990, 11(3):199-203.

- 199-203.
- [37] 张增耀,杨松岭. 塔里木盆地内震旦系特征[J]. 海相油气地质, 2007,12(2):51-56.
Zhang Zhenyao, Yang Songlin. Characteristics of Intrabasinal Sinian Sedimentary System in Tarim Basin[J]. Marine oil & gas geology, 2007,12(2):51-56.
- [38] 叶德胜. 塔里木盆地东北地区震旦-奥陶系白云岩的储集性[J]. 石油实验地质,1992,14(2):125-134.
Ye Desheng. Reservoir property of the Sinian-Ordovician dolomites in the northeast Tarim basin[J]. Petroleum Geology & Experimental, 1992,14(2):125-134.
- [39] 叶德胜. 塔里木盆地北部震旦系至奥陶系白云岩的岩石学及地球化学特征[J]. 地球化学,1993,93(1):1-9.
Ye Desheng. Lithology and geochemical characteristics of the Sinian-Ordovician dolomites in the northern Tarim basin[J]. Geochimica, 1993,93(1):1-9.
- [40] 刘永福,桑洪,孙雄伟,等. 塔里木盆地东部震旦-寒武白云岩类型及成因[J]. 西南石油大学学报,2008,30(5):27-31.
Liu Yongfu, Sang Hong, Sun Xiongwei et al. The types and genesis of Cambrian and Siinurian dolostone in Eastern Tarim Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008,30(5):27-31.
- [41] 何金有. 塔里木盆地震旦系古岩溶储层研究及油气勘探意义-何金有[D]. 北京:中国石油勘探开发研究院,2010.
He Jinyou. Study of the Sinian Karstedt reservoirs of Tarim basin and its significance for petroleum exploration[D]. Beijing: Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Petrochina, 2010.
- [42] 程裕淇,王泽九,黄枝高. 中国地层典·总论[M]. 北京:地质出版社,2009.
Cheng Yuqi, Wang Zejiu, Huang Zhigao. General Treatise of Chinese strata[M]. Beijing: Geological Press, 2009.
- [43] 梁玉左,朱士兴,高振家,等. 叠层石研究的新进展-微生物岩[J]. 中国区域地质,1995,(1):57-65.
Liang Yuzuo, Zhu Shixing, Gao Zhenjia, et al. New progress in the study of stromatolites-microbialite[M]. Regional Geology of China, 1995,(1):57-65.
- [44] 梁玉左,朱士兴,高振家,等. 叠层石研究的新进展-微生物岩[J]. 中国区域地质,1995,(1):57-65.
Liang Yuzuo, Zhu Shixing, Gao Zhenjia et al. New progress in the study of stromatolites-microbialite[J]. Regional Geology of China, 1995,(1):57-65.
- [45] 王杰琼,刘波,罗平,等. 塔里木盆地西北缘震旦系混积岩类型及成因[J]. 成都理工大学学报(自然科学版). 41(3):339-346.
Wang Jieqiong, Liu Bo, Luo Ping et al. Classification and genesis of Sinian mixed sedimentite from northwest margin of Tarim basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 41(3):339-346.
- [46] 梅冥相. 微生物席的特征和属性:微生物席沉积学的理论基础[J]. 古地理学报,2014,16(3):285-304.
Mei Mingxiang. Feature and nature of microbial-mat: Theoretical basis of microbial-mat sedimentology[J]. Journal of Paleogeography, 2014, 16(3):285-304.
- [47] Cohen Y. Photosynthesis in cyanobacterial mats and its relation to the sulfur cycle: A model for microbial sulfur interactions[A]. In: Cohen Y, Rosenberg E (eds). Microbial Mats: Physiological Ecology of Benthic Microbial Communities[M]. Washington: ASM, 1989:22-36.
- [48] Wachendorfer V, Krumbein W E, Schellnhuber H J. Bacteriogenic porosity of marine sediments: A case of biomorphogenesis of sedimentary rocks[A]. In: Krumbein W E, Paterson D M, Stal L J (eds). Bio-stabilization of Sediments[M]. Oldenburg: Bibliotheks Informations system (BIS), 1994:203-220.
- [49] 张荫本. 震旦纪白云岩中的葡萄状构造成因初探[J]. 石油实验地质,1980,4:40-43.
Zhang Yinben. Preliminary study on the botryoidal structures in the Sinian dolostones[J]. Petroleum Geology & Experimental, 1980,4:40-43.
- [50] 向芳,洪德,张锦泉. 资阳地区震旦系灯影组白云岩中葡萄花边的成因研究[J]. 矿物岩石,1998,18:136-138.
Xiang Fang, Hong De, Zhang Jinquan. Studying on the origin of botryoidal lace in dolomite of Dengying Formation, Sinian from Ziyang Sichuan[J]. Journal of Mineral Petrology, 1998,18:136-138.
- [51] 施泽进,梁平,王勇,等. 川东南地区灯影组葡萄石地球化学特征及成因分析[J]. 岩石学报,2011,27(8):2263-2271.
Shi Zhejing, Liang Ping, Wang Yong, et al. Geochemical characteristics and genesis of grapestone in Sinian Dengying Formation in southeastern Sichuan basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8):2263-2271.
- [52] 方少仙,侯方浩,董兆雄. 上震旦统灯影组中非叠层石生态系兰细菌白云岩[J]. 沉积学报,2003,21(1):96-105.
Fang Shaoxian, Hou Fanghao, Dong Zhaoxiong. Non-stromatolite Ecologic System cyanobacteria dolostone in Dengying Formation of Upper Sinian[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003,21(1):96-105.

(编辑 张玉银)