

文章编号: 1000-0550(2013)05-0807-17

# 微生物碳酸盐岩油气储层研究现状与展望

罗平<sup>1</sup> 王石<sup>1</sup> 李朋威<sup>2</sup> 宋金民<sup>3</sup> 金廷福<sup>3</sup> 王果谦<sup>3</sup> 杨式升<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石化勘探开发研究院 北京 100083; 3. 成都理工大学 成都 610059)

**摘要** 微生物碳酸盐岩是一种重要的油气储集岩。在中国古老深埋碳酸盐岩地层中它们是主要的岩石类型。微生物碳酸盐岩通常可划分为叠层石、凝块石、树枝石、均一石和核形石等五种类型。储层孔隙系统与微生物岩的沉积结构和构造密切相关。窗格孔(洞)和格架孔(洞)是主要储集空间类型。全球中新元古界至中生界都发现了以微生物碳酸盐岩为储层的油气田,资源潜力巨大。微生物岩储层的岩石类型、沉积构造、相序结构、沉积模式和储层有利相带尚有许多不明晰之处,是今后进一步深化研究的重点方向。

**关键词** 微生物岩 碳酸盐岩储层 叠层石 凝块石 微生物席

**第一作者简介** 罗平 男 1956年出生 教授级高工 博士 油气储层地质 E-mail: pluo@petrochina.com.cn  
**中图分类号** TE122.2 **文献标志码** A

## 0 引言

微生物碳酸盐岩分布广泛,时代上可以追溯到古太古代,并以中新元古界、寒武系和奥陶系最为发育。微生物碳酸盐岩主要发育于古老的地层中,埋藏较深。美国阿拉巴马州、东西伯利亚地区、巴西桑托斯盆地、阿曼盐盆、哈萨克斯坦以及中国的四川盆地和华北地区均有重大油气发现。我国四川盆地威远气田和东西伯利亚里菲系油气藏为典型的自生自储式油气藏。随着深层勘探的不断深入,埋藏深、时代老的微生物碳酸盐岩成为主要的目的层。因此,微生物碳酸盐岩储层研究成为重要的油气储层研究领域。

## 1 历史回顾

### 1.1 微生物岩的概念

微生物岩的概念定型较晚,但其研究历史长达200余年。R. V. Burne(1987)最早提出微生物岩(Microbialite)一词<sup>[1]</sup>,后Riding(1991)改为“Microb-olite”<sup>[2]</sup>,但目前仍用“Microbialite”<sup>[3-6]</sup>。这类岩石是由底栖微生物群落通过捕获与黏结碎屑沉积物,或经与微生物活动相关的无机或有机诱导矿化作用在原地形成的沉积物(岩)<sup>[1,2,7]</sup>。微生物岩这一概念的提出是人们对微生物沉积作用认识逐步提高的结果。追溯微生物岩的典型代表,叠层石已有两百多年的研究历史。20世纪70年代,上寒武统一下奥陶统发现了更多的具有宏观凝块构造一类岩石,这类岩石在微

观组分上类似叠层石,但缺乏叠层构造,Aitken(1967)将其命名为凝块石“Thrombolite”<sup>[8]</sup>。后来,Awramick与Margulis(1974)<sup>[9]</sup>扩大了叠层石的含义,不再强调其叠层构造,并将凝块石归入叠层石的范畴内。但为了区分这两种宏观构造以及避免概念的混淆,Burne与Moore于1987年提出了微生物岩的概念,将叠层石与凝块石作为微生物岩的两大类型<sup>[1]</sup>。随后,树枝石(岩)“Dentrolite”和均一石(岩)“leiolite”也相继被提出并被纳入微生物岩的大类中<sup>[2,5,10]</sup>。

微生物岩研究中最多的与微生物活动密切相关的生物—沉积构造和沉积物:如叠层石、凝块石、树枝石等,以及某些鲕粒、团粒、核形石、球粒和泥晶。其矿物成分可由碳酸盐、磷灰石、铁质、锰质矿物和有机质组成,也可由硫化物、黏土和各种硅质碎屑岩组成。其中,目前研究较多的,同时分布最为广泛的是由碳酸盐组成的微生物岩,即微生物碳酸盐岩。微生物碳酸盐岩研究的焦点在于钙化生物膜(Calcified biofilm)和微生物席(Microbial mat),以及它们在地质历史中的记录<sup>[3]</sup>。

### 1.2 造岩微生物

微生物一般泛指一切微观生物,包括细菌、真菌、微体藻类以及原生动物,其中细菌,尤其是蓝细菌常为微生物碳酸盐岩研究的主要对象,重点强调其对碳酸盐沉积物的形成与固定能力<sup>[3,7]</sup>。蓝细菌(简称蓝菌)是一种似藻类细菌并具有营光合和固氮作

收稿日期:2013-07-31

用<sup>[10,11]</sup>。在“微生物岩”这一术语提出之前,蓝细菌常被看作一种藻类(Algae),曾被称为蓝绿藻或蓝藻,由此,Aitken(1967)<sup>[9]</sup>曾将微生物灰岩称为“隐藻灰岩”,以区别于主要由钙藻骨骼大量堆积而形成的“钙藻灰岩(Calcareous algal limestones)”。后研究其为原核生物,与真核藻类是两类不同的生物,故称为蓝细菌或蓝菌<sup>[12]</sup>。

蓝细菌最早出现于太古宇,并一直延续至今。研究表明,蓝细菌在镜下主要呈球状、丝状体,也有报道称呈螺旋状<sup>[7]</sup>。另外研究较多的疑似为蓝细菌的钙质微生物主要有葛万菌(*Girvanella*)、表附菌(*Epiphyton*)、肾形菌(*Renalcis*)及灌木菌(*Frutexitis*)等。这些钙质微生物在寒武纪开始出现,并延续至泥盆纪,其中葛万菌一直延续到白垩纪,甚至到更晚的始新世<sup>[12]</sup>。葛万菌可以形成结核状构造,成为葛万菌核形石。这些核形石发育于周期性强大的波浪或潮汐作用的地区,内部具有不规则的层纹和呈扭曲状层纹,镜下可见相互缠绕的丝状体;表附菌为一种分布广泛的钙质微生物,常呈树枝状生长形态,具有较粗的分枝,往往形成大型生长体,并与其他骨架生物一起形成重要的造岩生物;肾形菌,呈团块状,类球粒状堆聚在一起,也可呈小型分叉状丛体或丘体。它们可以形成相互支撑的生长构造,同时也可以作为包覆生物,把其他的骨架生物联结在一起。灌木菌呈钙化指状生长形式,富含铁和铀,可能是一种蓝细菌<sup>[13]</sup>。

## 2 微生物岩类型

微生物岩的分类方案分歧较大,这主要与各研究者采用的分类依据有关。目前,微生物碳酸盐岩的分类依据主要有微观结构(microfabrics)、宏观(macrostructures)和巨观构造(megastructures)。微观结构常常难以保存,一般很少作为分类依据;宏观构造特征,如叠层、凝块、微指状、块状等,易于观察,被用作分类的主要依据。而巨观构造特征,如整个微生物岩建造、礁(bioherms/reefs)则极少作为分类的依据<sup>[7]</sup>。

Aitken(1967)最早提出了藻碳酸盐岩划分方案,将其分为两大类:部分或全部由骨骼钙藻组成的碳酸盐岩和隐藻碳酸盐岩<sup>[8]</sup>。其中,隐藻碳酸盐岩又进一步划分为隐藻生物岩和隐藻碎屑碳酸盐岩。隐藻生物岩包括核形石、叠层石、凝块石和隐藻纹层石,是目前微生物岩的范围。在该分类中的“隐藻”即为现在的蓝细菌。Kennard和James(1986)提出了

“中观凝块石”(mesoclots)这一概念,并认为其大小厘定为“mm级或cm级”。并以凝块、纹层和均质三种结构为三端元提出了“三端元”分类方案<sup>[14]</sup>。继而,Burne和Moore等(1987)将微生物岩分为叠层石、核形石、凝块石、隐生石(隐生结构)和球粒石(球粒结构)五种类型,首次提出隐生石、球粒石等微生物岩<sup>[1]</sup>。Riding(1991)在结构分类的基础上,综合考虑了微生物岩的内部结构、宏观构造和微生物与沉积物之间的作用方式和特点等,将微生物岩分为叠层石、树枝石、凝块石、石灰华(钙华)、隐微生物碳酸盐,并将叠层石细分为黏结叠层石、石灰华叠层石、骨骼叠层石、陆表叠层石<sup>[2]</sup>,扩充了微生物碳酸盐岩的研究范围,将表生环境下形成的石灰华也作为微生物碳酸盐的一种。由于微生物岩球粒结构非常常见,因此Leinfelder和Schmid(2000)提出了球粒微生物岩的分类方案,并将纹层结构、球粒结构、凝块结构作为分类的三个基本端元<sup>[15]</sup>,补充和完善了微生物碳酸盐岩的分类方案。近年来,Riding(2000)按照宏观组构(macrofabrics)将微生物碳酸盐岩重新做了划分,并分为四类,即叠层石、凝块石、树枝石和均一石,将其1991年划分方案中的“石灰华”排除在了微生物碳酸盐岩之外,可能考虑到“石灰华”常作为现代表生环境一种沉积物,还未经埋藏成岩<sup>[3]</sup>。我国学者方少仙(2003)沿用了古微生物(蓝细菌)分类方法,按照微生物的生态系统,将微生物岩分为两大类:叠成石生态系微生物岩和非叠成石生态系微生物岩,并将叠层石、层纹石、核形石看作同一类叠成石生态系微生物岩<sup>[16]</sup>。梅冥相等(2007)在Riding(2000)分类的基础上,将核形石(Oncolites)和层纹石(Laminites)划分到了微生物碳酸盐岩中<sup>[17]</sup>。韩作振(2009)认为寒武系大量发育的以表附菌、肾形菌等为格架的微生物格架岩并不具备Riding(2000)<sup>[3]</sup>和梅冥相等(2007)<sup>[17]</sup>划分的微生物岩的典型构造,因此,认为需根据实际情况来对微生物碳酸盐岩进行描述和分类研究<sup>[18]</sup>。下面就最常见的叠层石和凝块石进行详述。

### 2.1 叠层石

叠层石的发现距今已有两百多年历史<sup>[19]</sup>,在这两百多年中,人们对叠层石的认识在不断地深化。

#### 2.1.1 叠层石成因及其形成过程

Walcott(1914)在元古宙硅质叠层石纹层中首次发现似蓝菌的微体化石,因而他认为叠层石是碳酸盐通过蓝菌的作用沉淀而成<sup>[20]</sup>。1974年,Awramik等对叠层石的定义重新做了厘定,认为“叠层石是以蓝

藻(蓝菌)为主的微生物在生长和新陈代谢活动过程中粘附和沉淀矿物质或捕获矿物的颗粒而形成的一种生物沉积构造”<sup>[9]</sup>。Awramik(1971)进一步阐明了叠层石形态与微生物群落的关系,认为在层状叠层石中球形蓝藻(蓝菌)占统治地位,在柱状叠层石中丝状蓝藻(蓝菌)占统治地位<sup>[21]</sup>。Walter(1976)同意将蓝藻划入细菌的意见,强调微生物群落(主要是细菌)对形成叠层石的主导作用,认为叠层石是由微生物群落生长和代谢活动引起沉积物圈捕、黏结和沉淀而产生的<sup>[22]</sup>。尽管颗粒捕获作用在局部微生物碳酸盐沉积作用中非常重要,但Riding(2000)认为关键过程还是微生物的诱导沉淀作用<sup>[3]</sup>。微生物席和叠层石是紧密相关的构造,Zhang和Hoffmann(1992)认为,叠层石是石化的或化石的微生物席<sup>[23]</sup>。微生物结构能够反映微生物及其沉积过程的多样性,并叠加了微生物席的特征<sup>[4]</sup>。20世纪90年代以后的研究成果表明,尽管丝状微生物趋光性形成的层理在自然界具一定普遍性,但并不是所有造席丝体都具明显趋光性。从20世纪末至21世纪初,开展了叠层石生长的系统性实验。实验表明,叠层石泥晶纹层的形成与微生物对硫酸盐还原作用有关,硫的还原可以导致CaCO<sub>3</sub>的沉淀。现代海洋叠层石研究表明叠层石的生长过程是蓝菌沉积作用和间歇成岩作用的不断交替。

针对叠层石的微生物成因,学术界一直存在着争议。古太古代“叠层石”的成因曾经是学术界争议的焦点。随着对叠层石认识的提高与加深,地质学家们开始试图寻找微生物成因的判识标准。他们发现叠层石并非完全是微生物成因,也可能完全为一种化学沉淀成因的叠层构造。Allwood等(2006)根据澳大利亚古太古代Strelley Pool硅质岩3.43Gyr露头中叠层石的结构、形态、稀土元素特征判定其为生物成因<sup>[24]</sup>。Riding(2011a,2011b)根据叠层石的内部纹层的结构特征提出了“细粒壳”、“亮晶壳”与“混合壳”,并重新厘定了对叠层石的定义,认为叠层石应为宏观上层状的自生微生物沉积物,具有或者没有亮晶夹壳<sup>[5,6]</sup>。同时,建议将叠层石这一内部结构特征作为判别叠层石微生物成因的重要指标之一。

### 2.1.2 叠层石形态

20世纪60至70年代是国际上叠层石研究最为活跃的时期。关注点集中在叠层石的形态的成因,一些叠层石学家坚持前寒武纪叠层石形态学主要受微生物的进化和生化作用的制约的观点;而另一些沉积

学家认为叠层石形态主要受环境因素控制<sup>[25]</sup>。

中国学者将叠层石中首次生长的最基部的微生物席称为“开端微生物席”,以后连续生长的微生物席称为“继承微生物席”。研究发现,叠层石的形态发生似乎取决于开端微生物席的造型,叠层石发育和增长取决于继承微生物席生长的连续性<sup>[26]</sup>。

目前叠层石形态研究已经取得了两点基本共识:

1) 叠层石形态特征既受环境因素影响,又受微生物类群的制约;2) 叠层石礁和柱体宏体特征受环境影响较大,而叠层石的细小特征,如柱体分叉、侧部装饰、层理和微构造等主要受微生物种群进化所控制<sup>[26]</sup>。

### 2.1.3 叠层石地史分布

叠层石是地球上古老生命活动的证据,在地质历史上分布广泛,最早出现于古太古代(3.45 Ga),并一直延续至今。元古宙是叠层石繁盛的重要层系,特别是中一新元古代,分布广、规模较大、类型多;其类型可达近400种。叠层石为前寒武系最主要的微生物岩类型<sup>[27]</sup>。

显生宙叠层石相对前寒武系来说明显减少,并主要出现在寒武系至下奥陶统,此时凝块石、树枝石开始广泛发育<sup>[4]</sup>,并与后生生物一起或单独参与造礁,形成复合礁<sup>[28,29]</sup>。中奥陶世至现代,虽然微生物岩呈现下降趋势,但在生物礁建造方面仍扮演着重要的角色<sup>[3]</sup>。安徽东至建新剖面红花园组的生物礁中,蓝菌类(*Girvanella*)是生物礁的主要造礁成分<sup>[30]</sup>。另外,晚泥盆世微生物岩主要为肾形菌生物丘和叠层石礁<sup>[31]</sup>。

Riding(2011b)在提出叠层石的壳层分类之后,对它们在地质历史上的分布也分别做了简要阐述<sup>[5,6]</sup>。其中,混合壳叠层石与“亮晶壳”主要发育于前寒武系。细粒叠层石与凝块石则主要发育于新元古代至现代海洋沉积物中。而粗粒叠层石与凝块石则主要出现于侏罗纪至今。另外,对微生物席的存在具有指示作用的揉皱构造(Winkle structure)在古太古代就已出现,并一直延续至今(图1)。

有些学者认为新元古代以来叠层石衰退与后生动物的钻孔和牧食、真核藻类和后生植物的空间竞争,以及地球表面的环境变化有关<sup>[4,23,32]</sup>。同时,研究表明叠层石在地质历史上的演化可能与海水的碳酸盐饱和度也有关系<sup>[33]</sup>。因此,叠层石的形成与演化可能受到多个因素的影响,反映了地质历史中生物发展与环境的变化。

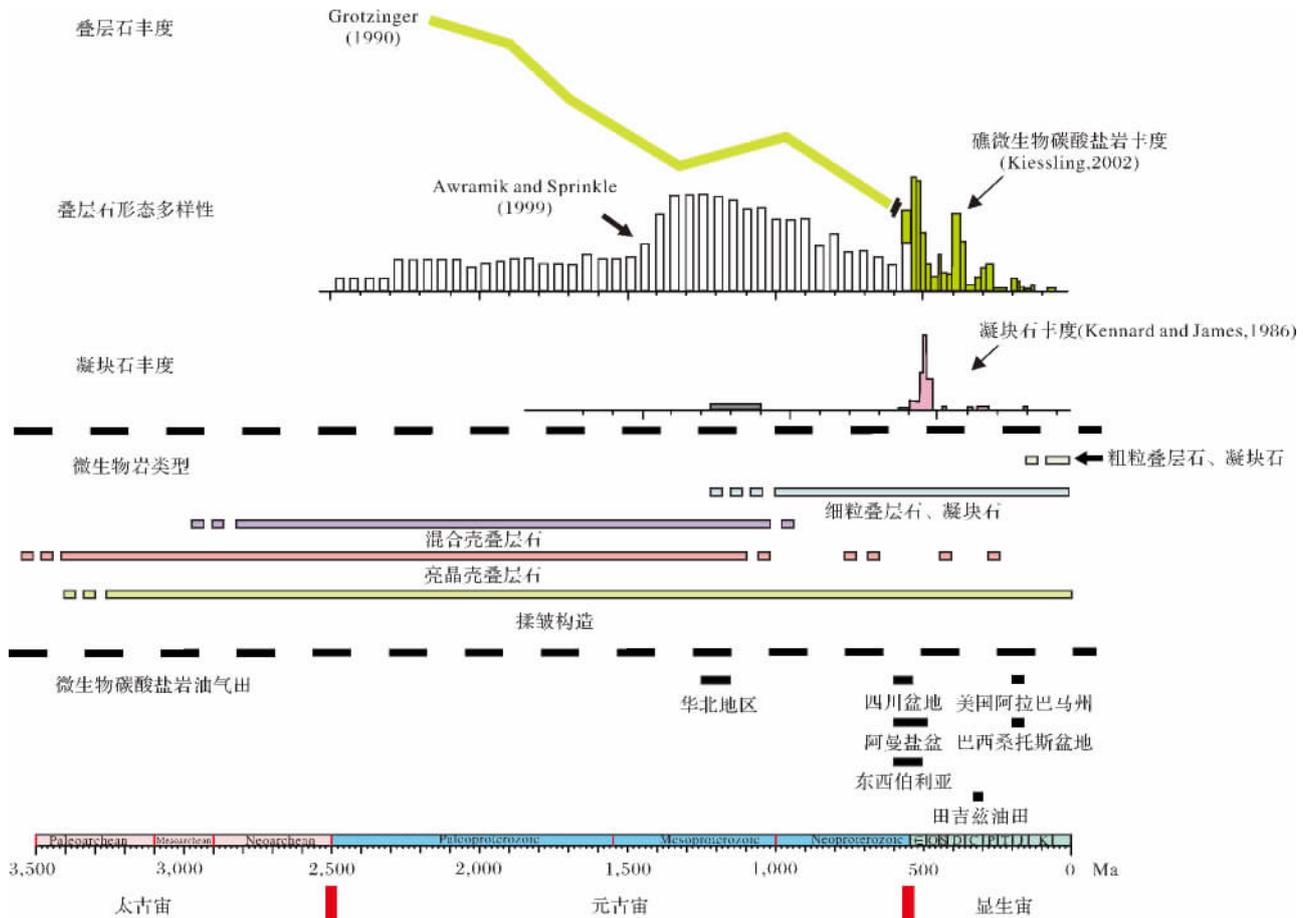


图1 微生物碳酸盐岩演化及相关油气田在地质历史中的分布(据 Riding<sup>[4]</sup> 2006; 修改)

Fig.1 Evolution of microbialites and the distribution of associated oil-gas fields in the geological history( after Riding<sup>[4]</sup> 2006; modified)

2.1.4 叠层石形态及其沉积环境

叠层石按其宏观形态看,类型多样。以平行纹层状、柱状( columns)、穹状( domes)和锥状( coniforms)为其基本特征<sup>[3,4]</sup>。Allwood等(2006)在澳大利亚古太古代 Strelley Pool 硅质岩(3.43 Gyr)露头中识别出七种形态各异的叠层石,如包壳状、圆屋顶状、圆锥状、尖脊状、大型复合圆锥状、波状等<sup>[24]</sup>。又如,我国浙西晚震旦世微生物礁叠层石呈纹层状、波状、穹状、柱状、指状等。

叠层石在不同的水深条件下均可生长,但主要生活在潮间及浅潮下带<sup>[14,34]</sup>;朱士兴(1993)指出,温度和盐度偏高的浅水环境最为有利<sup>[35]</sup>。南阿曼盐盆新元古代一早寒武世的叠层石主要发育于台地潮缘带<sup>[36]</sup>。四川盆地震旦系灯影组二段叠层石主要发育于开阔微动荡浅水潮坪环境<sup>[36,38]</sup>。墨西哥海湾东北上侏罗统 Smackover 组内叠层石主要发育于缓坡潮间带<sup>[39]</sup>。深水叠层石也有报道,加拿大 Borden 半岛发育中元古代深水叠层石礁,规模较大,单个礁体最

厚达 130 m,长可达 1 km,层状—圆柱状—锥状叠层石往往构成叠层石建造的一个旋回单元。这些叠层石礁位于台地斜坡带,是最大洪泛面的标志之一<sup>[40]</sup>。也有报道称深水叠层石与凝缩磷矿层共生。

叠层石的形态特征与海岸带沉积环境如水深、水动力等具有明显的相关性。其中,锥状、孤立柱状叠层石主要发育在潮下带较深水环境;层锥叠层石、假柱叠层石以及层穹和部分穹形叠层石一般与菌纹层相伴生,多见于潮间带环境;层状叠层石、层穹状叠层石以及揉皱构造则主要见于潮上带环境。由此,多数的学者建立了叠层石在不同沉积环境条件下的分布模式(图2)<sup>[41-43]</sup>。

2.2 凝块石

2.2.1 凝块石成因及其地史分布

凝块石最早由 Aitken (1967)提出,系指与叠层石相关的隐藻组构,但缺乏纹层而以宏观的凝块结构为特征的一类岩石<sup>[8]</sup>。凝块石是一种重要的微生物岩类型,最早出现于中元古代<sup>[44,45]</sup>,广泛发育于晚寒



图 2 叠层石沉积模式(综合钱迈平<sup>[41]</sup>, Guhey, *et al.*,<sup>[42]</sup> James and Dalrymple<sup>[43]</sup>)

Fig. 2 Depositional model for stromatolites( after Qian Maiping<sup>[41]</sup>; Guhey, *et al.*,<sup>[42]</sup> James and Dolrymple<sup>[43]</sup>)

武世至早奥陶世<sup>[14]</sup>,并一直延续至今<sup>[3,6]</sup>。如美国阿拉巴马州中上侏罗统 smackover 组可见大型的凝块石礁体(图 3)<sup>[39]</sup>。

针对凝块石的成因,学术界存在着两种截然不同的观点。一种认为是成岩改造而成<sup>[46,47]</sup>。但多数学者持生物成因的观点,并且存在 3 种不同的看法。(1)认为由原先的叠层石经生物扰动改造而成,原因是凝块石和叠层石外部形态有相似性<sup>[21]</sup>。这种观点解释了随着显生宙后生动物出现、衍射,原始叠层组构造明显下降,凝块石开始大量出现。Walter 和 Heys (1985) 也认为凝块石形成是由后生动物的挖洞和钻孔所形成<sup>[47]</sup>。Kennard(1986) 和 Pratt(1982) 对叠层石与凝块石间过渡形态的频繁出现做了一定的研究<sup>[15,48]</sup>。(2)认为凝块组可能通过有机物质的降解形成;Kobluk and Crawford(1990) 提出了类似的想法,认为凝块石的凝块可能是叠层石内部细菌硫酸盐还原石膏降解而成<sup>[49]</sup>。(3)认为凝块组是由微生物群落本身的差异所引起的,与球形菌占主导的微生物群体同期生长和钙化作用有关,并非原始叠层构造的瓦解或改造。曹仁关(1980)<sup>[50]</sup>对我国南方震旦系灯影组以及 Aitken 等(1989) 该时期的兰花组和里菲系凝块石的研究排除了凝块石系由后生动物扰动的成因说,并认为可能存在由微生物活动或钙化作用所形成的原生凝块石<sup>[51]</sup>。寒武—奥陶纪钙化蓝细菌的大量出现可能是这一时期凝块石极其发育的重要因素。现代柱状凝块石质叠层石(如鲨鱼湾)之所以具有粗的结构与差的纹层被认为与大量的藻类(包括硅藻)共生有关,藻类的出现提高了微生物群落对粗粒沉积物的捕获能力<sup>[52]</sup>。

### 2.2.2 凝块石的宏观、微观特征

凝块石具有多种宏观构造特征,如层状、团块状、指状、穹窿状、礁体块状等。尽管 Aitken(1967) 将凝块定义为一种宏观结构<sup>[8]</sup>,但在实际应用中凝块常

作为一个更宽泛的概念。凝块的范围可以从厘米级的不规则圆状到长条形的支状,甚至是毫米级微观凝块。Riding(2000) 将凝块石分为两类:钙化微生物凝块石和粗粒聚集凝块石。钙化微生物凝块石中的凝块主要由钙化微化石组成,如葛万菌丝状体、肾形菌葡萄石等,其凝块可以是不规则的圆状,也可以是长条形的枝状等<sup>[3]</sup>。这类凝块石在寒武系至奥陶系比较常见。粗粒聚集凝块石主要由微生物捕获的砂级沉积物组成。这类凝块石仅见于新近系,它们的出现可能与藻—蓝细菌席大量出现有关。

### 2.2.3 凝块石沉积环境

现代凝块石通常发育在潮下带环境,而且沉积水深通常大于叠层石<sup>[8,53]</sup>。如巴哈马和鲨鱼湾地区凝块石多出现在水体较动荡、沉积速率较快且相对开阔的浅潮下带环境<sup>[1]</sup>。Ezaki 等(2003) 则认为低能、低沉积速率浅潮下带更有利于凝块石的形成<sup>[54]</sup>;吴亚生等(2006)<sup>[55]</sup>指出花斑状构造微生物岩为局限台地相沉积。说明较深水环境可能是凝块石发育的关键因素。同样,古老地层中的凝块石可能具有相似的沉积环境。我国学者余家仁等(1998) 对华北地台中元古代雾迷山组的凝块石沉积微相进行了详细研究,认为主要发育于水体动荡的浅潮下带,并且多呈厚层块状产出,少量为具丘状建隆构造,可见凝块石与锥状叠层石共生<sup>[45]</sup>。Grotzinger 与 Amthor(2002) 详细研究了阿曼盐盆新元古代—早寒武世的“ Ara 组”微生物岩沉积微相,发现凝块石主要发育于孤立台地的边缘和斜坡,而叠层石则发育于台地内潮间带环境<sup>[36]</sup>。Mancini 等(2004) 发现美国阿拉巴马州中上侏罗统 Smackover 组凝块石多以礁体形成产出,并对其沉积微相进行了详细研究<sup>[39]</sup>。他认为凝块石礁主要发育于向海一侧的深水环境,从内缓坡边缘向深水外缓坡依次发育凝块石建造、珊瑚—凝块石复合点礁和硅质海绵—凝块石复合礁丘。水体越深,则以复合礁建造

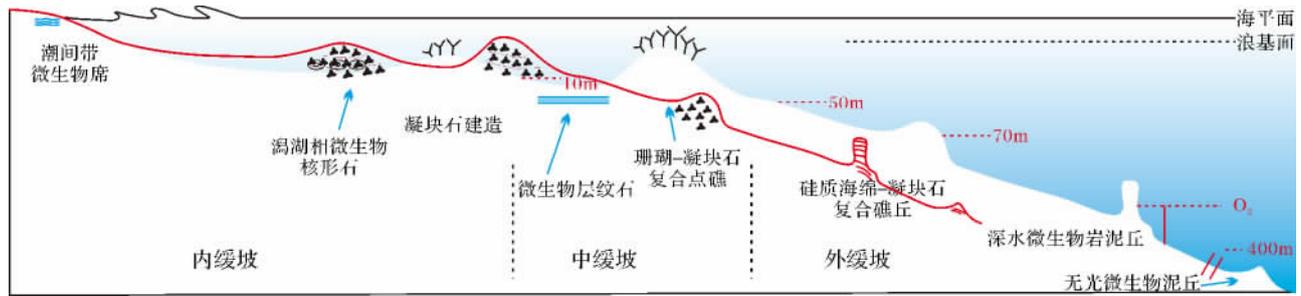


图3 美国阿拉巴马州中上侏罗统凝块石礁沉积模式(据 Mancini 等<sup>[39]</sup> 2004; 略改)

Fig. 3 Depositional model for the upper Jurassic thrombolite reefs in Alabama, USA (after Mancini. *et al*<sup>[39]</sup>, 2004; modified)

为特征<sup>[39]</sup>(图3)。

### 3 微生物碳酸盐岩油气勘探开发现状

微生物碳酸盐岩中蕴藏着巨大的油气资源,在全球范围内已找到多个油气田。如我国的四川盆地威远气田、资阳气藏和东北渤海湾盆地任丘油田,以及美国的阿拉巴马州阿普尔顿与 Little Cedar Creek 油田和东西伯利亚里菲系油气田。另外在巴西桑托斯盆地、阿曼盐盆、哈萨克斯坦滨里海盆地微生物碳酸盐岩储层中也有重大油气发现,储层地质时代跨越中元古代至侏罗纪,目前尤其在震旦系—寒武系、侏罗系微生物碳酸盐岩中发现油气最多(图1)。其中,四川盆地威远气田油气探明储量超过了  $400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。最近,高产气井—高石1井的发现表明我国四川盆地震旦系仍具有丰富油气资源,川中古隆起是震旦—寒武微生物碳酸盐岩油气最富集的构造之一。时代相近的东西伯利亚里菲系储集了该区 64% 油和 69% 的天然气,而寒武系分别为 10.7% 和 5.9%<sup>[56]</sup>。任丘油田为我国地层最古老的油田,其储层为中元古界蓟县系雾迷山组碳酸盐岩;叠层石、凝块石微生物岩储

层发育,1978 年石油产量约  $1723 \times 10^4 \text{ t}$ 。美国阿拉巴马州 Little Cedar Creek 油田为该州最大的油田,其储层为中上侏罗统凝块石礁体<sup>[39]</sup>。

微生物碳酸盐岩油气储层以叠层石、凝块石岩石类型最为常见,其次为核形石、层纹石等(表1)。这些均表明微生物碳酸盐岩能形成良好的储层,已成为油气勘探的关注重点。

### 4 我国微生物碳酸盐岩储层研究现状

我国含油气海相碳酸盐岩储层主要分布在三个地区(盆地),即华南上扬子地区(四川盆地)、华北地块(渤海湾盆地和鄂尔多斯盆地)和塔里木盆地。这三个地区的古老碳酸盐岩在地下埋藏深,经历了复杂的构造变化,勘探程度相对较低,是潜在油气大发现的主要目的层位。

#### 4.1 塔里木盆地

塔里木盆地的碳酸盐岩地层发育,从震旦系到石炭系均有,其中以震旦系至上奥陶统发育最好。与全球一致,微生物碳酸盐岩主要分布在震旦系至下奥陶统,类型多样,具有良好的油气储层性质。

表1 世界上主要的微生物碳酸盐岩油气田<sup>[44, 57-60]</sup>

Table 1 The main microbial carbonate oil-gas fields in the world

油气田名称	盆地/地区	地层	微生物储层岩石类型	油气储量
任丘油田	华北地区	中元古代雾迷山组	凝块石、锥状叠层石、核形石、层纹石	油 $9.6 \times 10^8 \text{ t}$
威远气田	四川盆地	震旦系灯影组	叠层石、层纹石、颗粒粘结岩、核形石、凝块石、球粒白云岩	(气) $408.6 \times 10^8 \text{ m}^3$
资阳气藏	四川盆地	震旦系灯影组	层纹石、核形石、叠层石	(气) $102 \times 10^8 \text{ m}^3$
东西伯利亚油气田	俄罗斯	中—新元古界至下寒武统	叠层石、凝块石等	(油气) $22.36 \times 10^8 \text{ toe}$
阿曼盐盆油气田	中东阿曼盐盆	上元古界—下寒武统	叠层石、凝块石	(油) $3.5 \times 10^8 \text{ t}$
田吉兹油田	哈萨克斯坦	下石炭统	叠层石、核形石、均一岩等	(油) $30 \times 10^8 \text{ t}$
Little Cedar Creek 油田	美国阿拉巴马州	上侏罗统 Smackover 组	凝块石	—
阿普尔顿 油田	美国阿拉巴马州	上侏罗统 Smackover 组	凝块石	—
Pre-Salt 油田	巴西桑托斯盆地	上侏罗统	凝块石	(油) $68 \times 10^8 \text{ t}$

注: 中国为地质储量, 国外为可采储量。

#### 4.1.1 震旦系

塔里木盆地震旦系广泛发育一套微生物白云岩,据叶德胜(1992)<sup>[61]</sup>统计,藻(蓝细菌)纹层白云岩(层状叠层石)约占齐格布拉克组上段的79.7%(图4)。目前针对这套白云岩的成因尚存在一定的争议。据统计,更多的学者支持准同生白云石化这一观点<sup>[62-63]</sup>,同时,史基安(1993)<sup>[62]</sup>认为,这类白云岩的形成是与震旦纪特殊气候条件下,藻类生物的促进作用分不开的。王小林等(2010)<sup>[64]</sup>在研究柯坪地区微生物白云岩过程中,发现了纳米球粒及不规则、片状白云石,并且藻(蓝细菌)白云岩具有与同期海相碳酸盐岩一致的碳同位素比值,因此,认为藻(蓝细菌)白云岩为微生物调制作用下的原生白云石。刘永福等(2008)<sup>[65]</sup>认为塔东地区震旦系残余藻(蓝细菌)纹层白云岩属混合水成因。

震旦系微生物白云岩是塔里木盆地一类重要的储集岩石类型,这一观点早在20世纪90年代初就得到了油气勘探家的认可<sup>[61-63]</sup>。储集空间以晶间孔、晶间溶孔及各种微孔隙为主,并有裂隙及溶洞等,常规物性及铸体薄片面孔率平均2~3%,扫描电镜观察表明尚有相当数量的微孔。震旦系白云岩储层发育主要受控于构造、沉积及成岩作用等。其中,埋藏调整白云石化作用及溶蚀作用(古风化壳溶蚀及深部溶蚀)是产生有效孔隙最重要的作用<sup>[61-63]</sup>。目前,钻遇该层位的塔北的沙4井产出了工业油气;在塔东地区,震旦系顶部白云岩也具有明显的油气显示。可见塔里木盆地震旦系具有相当的油气勘探潜力。

柯坪地区露头剖面,塔里木震旦系齐格布拉克组逾200 m厚的碳酸盐岩,主要为微生物碳酸盐岩,有效储集类型与微生物岩的类型密切相关;蓝细菌形成的窗格孔(或鸟眼孔)和泡沫绵层结构孔主要为原始孔隙类型;沉积环境为潮下浅水带,层状叠层石孔隙相对不发育。寒武系至震旦系之间有一重大沉积间断,形成了充分发育的古岩溶风化壳。因此,震旦系碳酸盐岩储层是复合成因,受原生微生物结构和岩溶双重作用影响,形成非常不均质的储层类型,其分布受古岩溶地貌和沉积相带控制。

#### 4.1.2 寒武系肖尔布拉克组微生物礁

塔里木盆地下古生界的寒武—奥陶系具有丰富的微生物碳酸盐岩,储层类型丰富,有层状、礁体两大类宏观形态。主要储层分布段位于下寒武统肖尔布拉克组、中寒武统沙依里克组,下奥陶统的蓬莱坝组、鹰山组,以及中奥陶统的一间房组和上奥陶统的良里

塔格组。下面对具有礁体形态的肖尔布拉克组举例描述。

塔里木盆地下寒武统肖尔布拉克组的微生物碳酸盐岩建造则主要为蓝细菌礁,是一种宏观的原地生长的高大起伏的微生物礁建隆。主要见于盆地西北缘阿克苏地区的苏盖特布拉克露头区。

蓝细菌礁主要有两种显微岩石结构类型:原地生长的附枝菌(又称表附菌)和微生物凝块(图5-G和H)。如图5-A所示,地震资料揭示寒武系是一个前积型的碳酸盐岩台地,台地边缘发育了良好的礁体。野外露头测量(图5-B)表明造礁生物石微生物礁。礁的生长分两期,一期前积型高幅度隆起礁,第二期是超覆地层的准层状低幅度隆起微生物点礁复合体。微生物岩类型主要有叠层石、凝块石、核形石(图5-E、F)。从宏观上来看,微生物礁呈宏观块体产出。蓝细菌礁白云岩的孔隙多属不规则粒间孔洞,面孔率在5~10%,孔径多小于1 mm。孔隙多分布于两类蓝细菌结构中,一类是暗色的蓝细菌斑块结构(图5-H),斑块大小在1×2 cm,呈不规则状,内部为泥晶结构;另一类是蓝细菌凝块结构,凝块大小在0.5~0.8×1 cm,呈不规则聚敛状。孔洞的发育呈现出较明显的非均质性,在蓝细菌结构发育的部位(图5-H),溶蚀孔洞较大,且分布相对连续,而在蓝细菌结构不发育的颗粒白云岩中,则发育毫米级的孔隙,故蓝细菌礁的礁核或礁盖部位,是蓝细菌微生物岩发育的部位,也是储层发育的有利相带,礁基为非储层段。

下寒武统的台缘带微生物礁具有良好的生储盖组合,下伏为玉尔吐斯组黑色页岩,上覆为中寒武统沙依里克组的膏质岩,勘探前景广阔,为塔里木盆地的潜在有利目的层。目前针对该层位的油气勘探正在进行。

## 4.2 四川盆地的微生物岩储层

四川盆地碳酸盐岩沉积始于震旦系灯影组,结束于中三叠世雷口坡组。微生物碳酸盐岩在震旦系最为发育,在二叠系长兴组礁体中亦有发现。在寒武系、奥陶系和志留—泥盆系中亦有产出。由于震旦系有大型油气田的发现,研究较为深入。目前,四川盆地震旦系灯影组已在川中地区发现威远、资阳等气田,而川东南地区震旦系灯影组同样主要为一套分布广泛、厚度稳定的微生物白云岩。

灯影组储集岩主要为白云岩类,岩石结构主要包括晶粒结构和微生物黏结结构的微生物白云岩。储层发育具有明显的岩石选择性,主要发育于菌席白云

岩、颗粒白云岩及粉—粗晶白云岩中。其中，菌席白云岩主要包括菌黏结白云岩、菌纹层白云岩、叠层石白云岩、凝块石白云岩等。其中与沉积期岩溶(简称层间岩溶)相关的一种微生物岩构造，具有葡萄石外观，俗称葡萄花边构造。是一种优质的储层类型。

微生物白云岩储层主要发育于灯影组的灯二—灯三段，多以厚层状产出，葡萄花边构造则主要出现

在灯二段的顶部和灯三段的底部<sup>[66]</sup>。这套地层经历了古风化壳岩溶以及沉积期岩溶、深埋岩溶、构造破裂等作用，储集空间类型多样，除窗格孔发育之外，次生孔、洞、缝非常发育，诸如粒间溶孔、粒内溶孔、针孔、晶间溶孔、泡沫绵层间溶孔等<sup>[67]</sup>。威远气田井下资料表明，该套地层孔洞直径一般小于1 cm，白云岩基质孔隙度和渗透率都很低，平均孔隙度约2%，渗

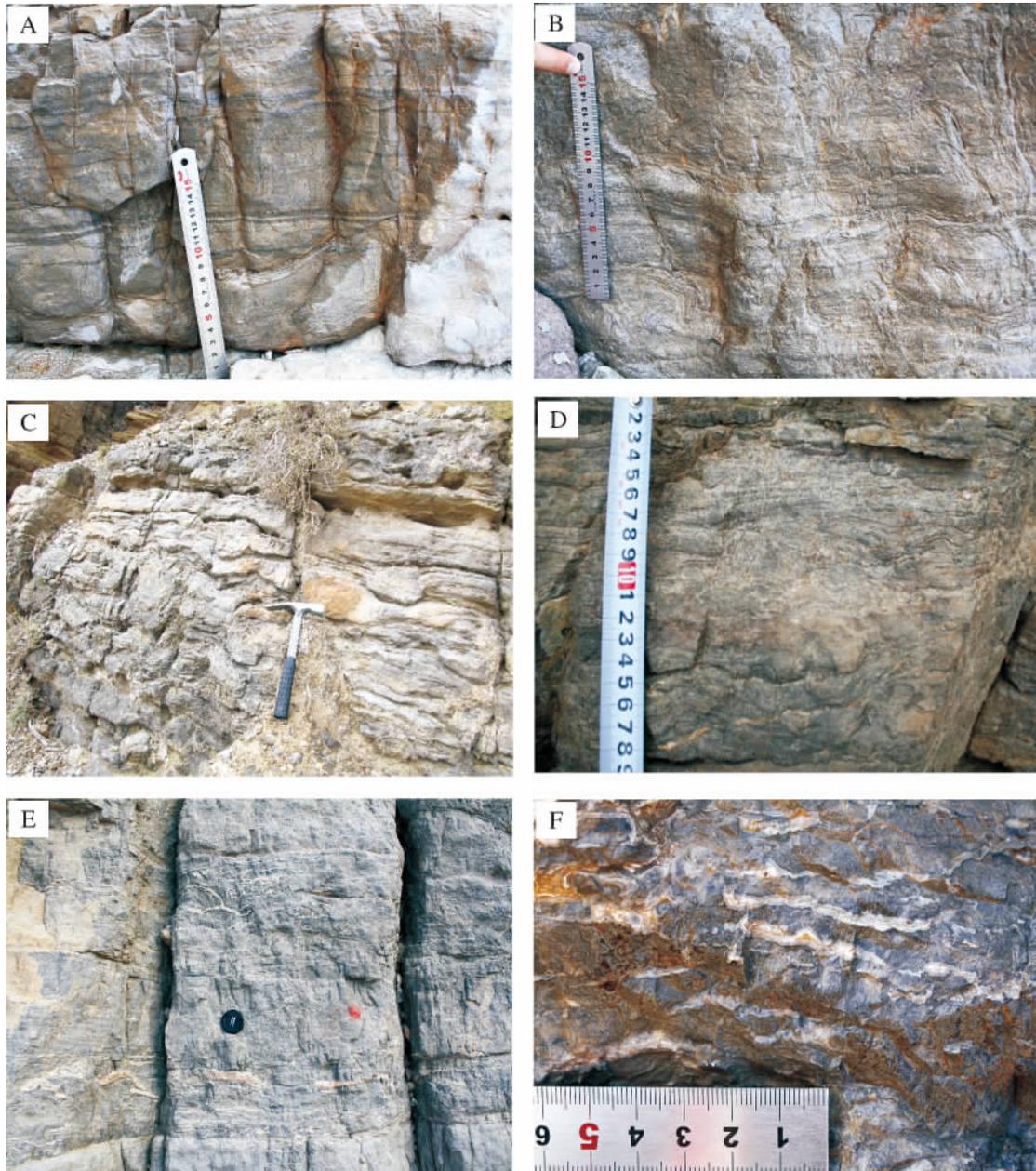


图4 塔里木震旦系层状叠层石的宏观特征

A. 层状叠层石白云岩，窗格构造发育，孔洞被白云石等充填。什艾日克剖面  $Z_2q$  第11层。B/C. 层状叠层石，水平纹层发育，亮暗相间。什艾日克剖面  $Z_2q$  第9层。D. 层状叠层石，花边构造发育，沿纹层近水平分布，似窗格构造。什艾日克剖面  $Z_2q$  第14层底部。E/F. 层状叠层石，纹层呈波状或微波状，断续分布。苏盖特布拉克剖面  $Z_2q$  第5层。

Fig. 4 Macroscopic characteristics of stratiform stromatolites on Sinian outcrop in Tarim Basin

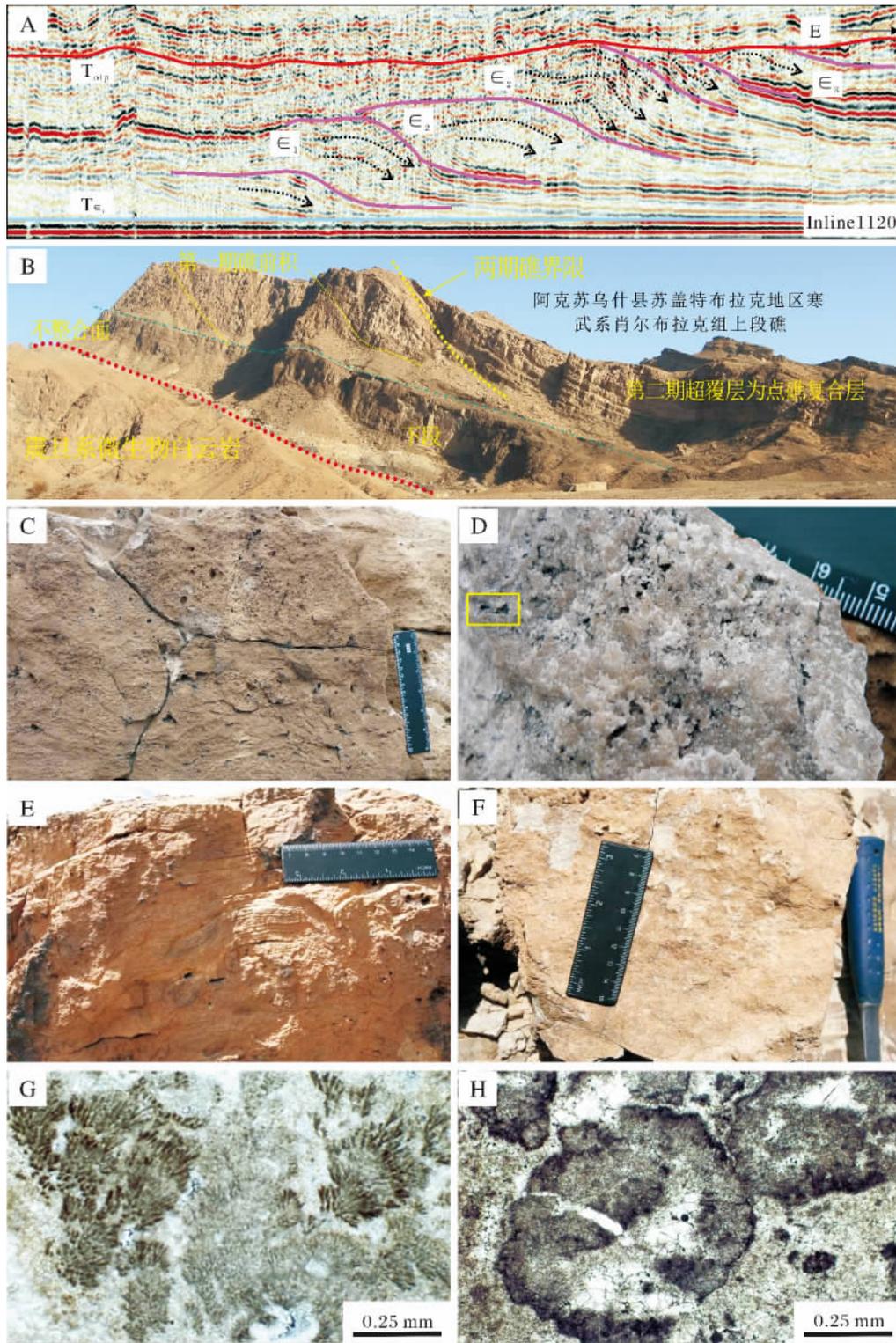


图 5 苏盖特布拉克地区蓝细菌礁储层发育段及孔隙特征

A. 塔里木盆地寒武系台地边缘微生物礁的前积结构, 东西向地震剖面清晰的展现了从下寒武统到上寒武统的多阶段礁体前积过程。B. 阿克苏乌什县苏盖特布拉克地区寒武系肖尔布拉克组上段礁(红色虚线以上)。C/D. 礁白云岩好储层, 孔隙度 8% 以上, 沥青充填(D 黄色框内)。E. 叠层石白云岩。F. 核形石白云岩。G. 残余表附菌泥晶白云岩, 为原地生长的表附菌架状结构(Epiphyton), 单偏光。H. 残余凝块泥粉晶白云岩, 0-13 层, 为蓝细菌凝块结构, 单偏光。

Fig. 5 Microbial texture, macrostructure and pore characteristics of Cambrian cyanobacteria reef in Sugaitblak area

透率为  $0.001 \sim 0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 岩心张开缝密度可达  $8 \sim 62.7$  条/m, 这些裂缝对于连通孔隙, 改善储层具有重要的作用。孔洞缝内可见多期、多世代的白云石、方解石和硅质等充填。菌纹层白云岩储集类型为裂缝—孔洞型, 纵向上有多个储渗层段<sup>[68]</sup>。

四川盆地震旦系灯影组白云岩以广泛产出形态类似葡萄状、皮壳状、肾状等形态的白云岩为特征(图6), 对于这种具有葡萄状花边结构的白云岩, 多数人把它看做是藻(蓝菌)白云岩或与藻(蓝菌)有成因关系的白云岩, 且有人以此作为标志层进行地层划分与对比。葡萄花边状白云岩的成因是由于海平面下降, 早期形成的藻(蓝菌)纹层白云岩暴露于大气中, 大气淡水进行淋滤时, 富含微生物纹层和叠层构造的泥晶白云岩遭受溶蚀, 后由微生物再次充填沉积作用形成。

#### 4.3 华北地区

##### 4.3.1 中新元古界

华北地区中新元古代发育最齐全的地层位于燕

山拗拉槽的天津蓟县地区。华北地区中新元古界地层可分为三个系十二个组, 上部缺失震旦系。微生物岩主要发育于长城系(中元古界)高于庄组和蓟县系(中元古界)雾迷山组, 厚度大, 类型丰富。其次团山子组和大红峪组可见少量微生物岩, 厚度小, 微生物岩类型单一。蓟县系上部铁岭组沉积了世界闻名的巨厚(180 m)叠层石礁层。雾迷山组微生物岩储层为华北地区任丘油田的主要产层。

华北地区蓟县系雾迷山组微生物碳酸盐岩厚度大(蓟县剖面厚逾3000 m), 类型比较丰富。微生物岩发育演化纵向上具有一定规律性, 主要以层状叠层石及凝块石块状层最为发育。其次为核形石、波状叠层石、柱状叠层石、丘状叠层石及锥状叠层石(图7)。

许多学者对华北地区中元古界雾迷山组微生物岩储层进行了研究(余家仁, 1981, 1986, 1998; 中国石油学会, 1988; 赵树栋等, 1997; 赵澄林等, 1996)<sup>[44, 45, 69~71]</sup>。主要从微生物储层岩石类型、储集空间发育、储层类型与划分等方面进行研究(详见表2)。

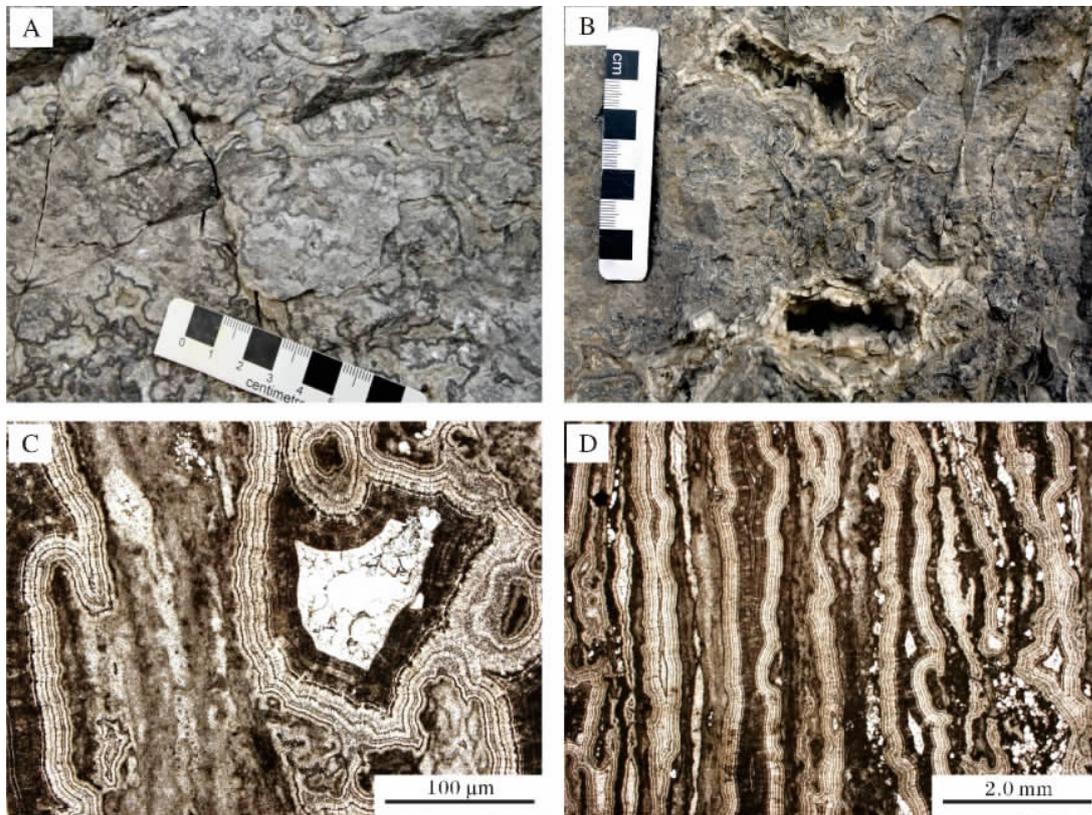


图6 四川灯影组葡萄花边构造宏观与微观结构

A. 葡萄花边构造。黑色花边与白色花边间互, 在中心留下孔洞或被胶结物充填。B. 震旦系灯影组微生物碳酸盐岩的葡萄花边构造是由微生物包覆作用形成的皮壳状外观, 具有不均质的孔洞系统。C. 显微镜下可见浅色花边, 暗黑色花边和凝块纹层。孔洞被等粒白云石胶结物充填。浅色花边内可见浅色纹层(厚), 暗色纹层(薄)。暗色花边中浅色纹层稀少或无。基质为凝块和球粒层。单偏光。D. 镜下葡萄花边构造。两种花边和凝块—球粒纹层。基本平行, 但花边纹层具有折返包络特征, 残余空间形成孔隙, 被等粒状白云石充填。单偏光。

Fig. 6 Typical photos of botryoidal lace structure in dolomitite of Dengying Formation, Sichuan

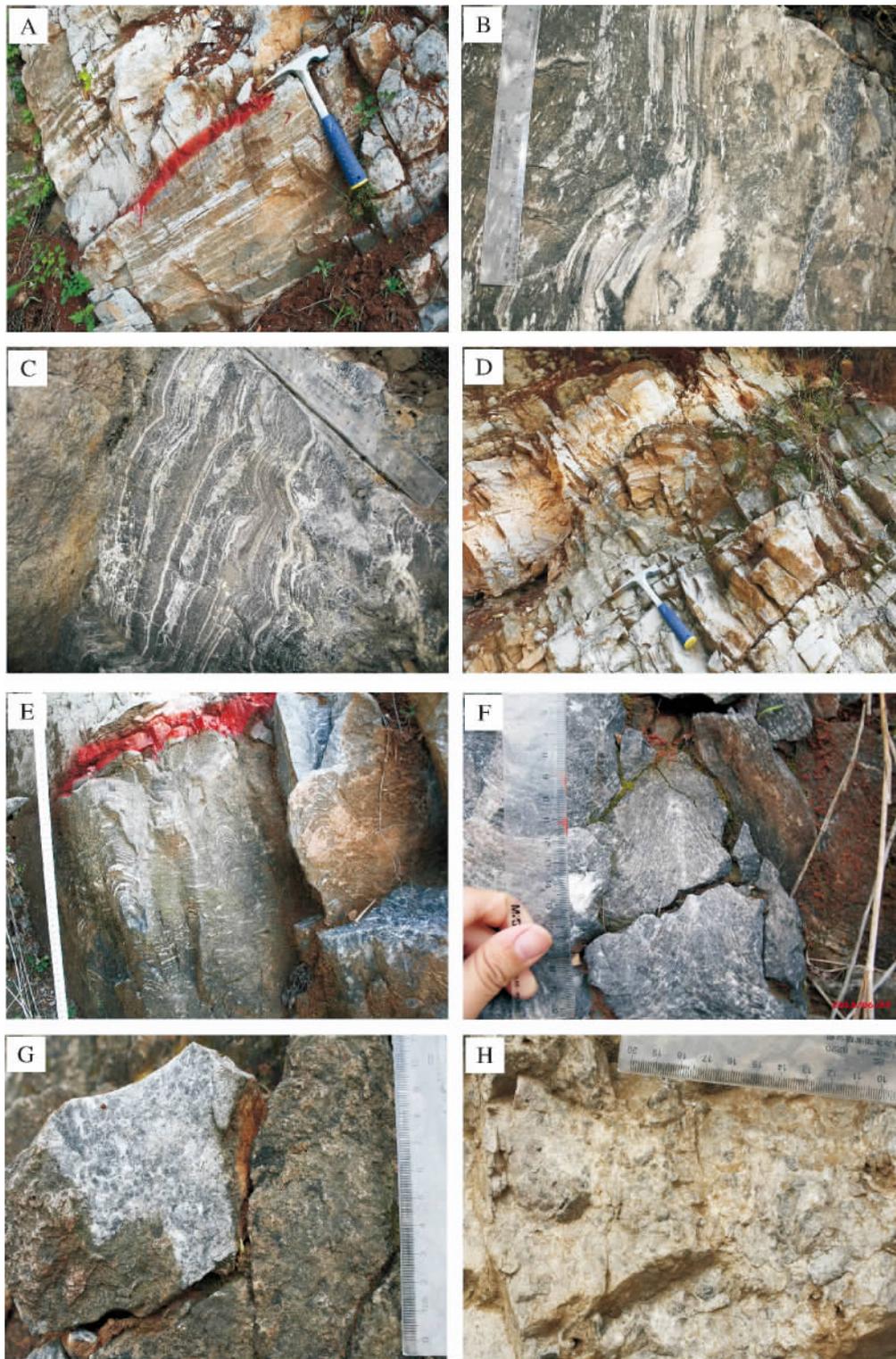


图 7 蓟县剖面雾迷山组微生物岩石宏观特征

A. 层状叠层石, 白色为硅质纹层。狐狸峪雾迷山组 8 段第 7 层。B. 层状叠层石, 纹层局部呈波状、上凸状。王庄子雾迷山组 2 段第 12 层。  
 C. 波状叠层石, 白色为中晶白云岩。王庄子雾迷山组 2 段第 11 层。D. 丘状叠层石, 狐狸峪雾迷山组 8 段第 8 层。E. 柱状叠层石, 狐狸峪雾迷山组 8 段第 3 层。  
 F. 锥状叠层石, 狐狸峪雾迷山组 8 段第 5 层中部。G. 凝块石, 凝块为黑色, 呈球形、椭圆形及不规则状。狐狸峪雾迷山组 8 段第 9 层。  
 H. 核形石, 为黑色, 呈球形、椭圆形及不规则状。赵家峪雾迷山组 6 段第 5 层。

Fig. 7 Macroscopic characteristics of Mesoproterozoic Wumishan Formation microbialite in North China

表2 任丘油田中元古界雾迷山组微生物岩储层特征与岩石结构<sup>[44 45 69-71]</sup>

Table 2 Mesoproterozoic Wumishan Formation microbialite reservoir characteristics and rock structure in Renqiu Oilfield

油气田名称	储层类型及产量	储层岩石分类	储层空间类型	孔隙度、渗透率及产油深度	结构特征
任丘油田	I类 好储集岩 产量 > 10 t/d	锥状叠层石	溶蚀孔隙、构造裂缝、粒间溶孔，	孔隙度： 2 ~ 3.96% 渗透率： 1.27 ~ 93.3 × 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> 深度： > 3 000 m	中高能水动力环境的粗结构，岩石以细晶为主
		白云岩	孔隙体积为 > 1 μm 喉道控制，储		
		凝块石白云岩	渗能力好		
		微层状凝块石			
		白云岩			
	II类 差储集岩 产量 1 ~ 10 t/d	核形石	溶蚀孔隙、构造裂缝、粒间溶孔，	孔隙度： 2 ~ 3.96% 渗透率： 1.27 ~ 93.3 × 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> 深度： > 3 000 m	中低能水动力环境的较粗结构，岩石以粗粉晶为主
		层纹石白云岩	孔隙体积为 0.2 ~ 1 μm 喉道控		
		小波纹叠层石	制，储渗性能均较差		
		白云岩			

余家仁(1981, 1998)<sup>[44 45]</sup>认为华北任丘油田雾迷山组凝块石之所以溶蚀孔隙发育与凝块石形成于高能环境,具有较粗的结构有关。在微生物碳酸盐岩储层研究中,其孔隙发育似乎多与凝块石有关,而叠层石内一般仅发育沿纹层或藻管的小溶孔(叶德胜, 1992)<sup>[61]</sup>。我国任丘油田雾迷山组微生物碳酸盐岩储层空间孔隙体积以 1 ~ 10 μm 为主,是属于基质孔隙系统的复合型储层(赵树栋等, 1997)<sup>[71]</sup>。

#### 4.3.2 寒武系

寒武纪华北地区为陆表海环境,整体为一碳酸盐岩台地。微生物岩在区内主要发育于馒头组、张夏组和崮山组。张夏组微生物岩在华北地台分布最广。梅冥相(2011)、常玉光等(2013)、陈金勇(2011)、迟乃杰(2011)等<sup>[72-75]</sup>分别对北京、豫西、鲁西、晋东地区微生物碳酸盐岩进行微观的系统研究、分类和描述。

概括起来,华北地区寒武系微生物岩类型总共有叠层石、凝块石、核形石、表附菌(又称树枝菌或附枝菌)、层纹石和少量均一石。主要为叠层石、凝块石和核形石。

叠层石类型主要有柱状叠层石、波状叠层石、水平状叠层石<sup>[72 73]</sup>、缓波状叠层石、半球状叠层石,以及围绕竹叶状泥灰岩砾屑生长的叠层石<sup>[74]</sup>。

凝块石类型主要有斑块状凝块石、网状凝块<sup>[75]</sup>。核形石类型主要有含鲕粒核形石灰岩、核形石灰岩与含生屑核形石<sup>[76]</sup>。

其中关于表附菌微生物岩的研究较为突出,鲁西寒武系第三统张夏组发育大量表附菌微生物灰岩。表附菌通常形成灌木状群落,生长于微生物丘内部。在微生物丘外部,由于水动力条件的影响,表附菌群

落呈房室状,与肾形菌十分相似。由于表附菌微生物岩模糊的中型构造,且其格架主要由表附菌形成,故可称其为表附菌格架岩。

张夏组的凝块石灰岩主要是由表附菌粘结和捕捉碳酸盐颗粒形成的。表附菌根据枝杈的直径大小,表枝的细胞状分割结构及结晶程度等,可分为5类:泥晶粗枝杈状(直径平均为 75 ~ 80 μm);泥晶分段枝杈状(直径平均为 80 μm);泥晶细枝杈状(直径平均为 4 μm);微晶管状枝杈状(直径平均小于 40 μm)和亮晶粗枝杈状(直径平均为 75 μm)。由此表附菌形成的对应菌落也可分为4类:泥晶树枝状、单个房室状、簇球状和亮晶树枝状<sup>[74 76]</sup>(表3)。

对华北地台寒武系微生物岩研究主要集中在微生物岩分类描述和微生物岩古沉积环境方面,与油气储层有关的研究较少。随着深层勘探的进展,未来在华北地区进行寒武系微生物碳酸盐岩油气储层研究显得越来越重要。

## 5 存在问题与研究展望

### 5.1 结论

微生物碳酸盐岩油气储层的形成首先是与微生物沉积作用有关,其次是埋藏或准同生时的成岩作用,以及后期构造活动导致的岩溶作用和裂缝作用。碳酸盐岩储层的发育虽然受制于其沉积后的成岩作用和构造活动。相对而言微生物沉积作用形成的原始结构和构造对储层的有效性起着关键作用。下面总结了几个粗略的结论。

(1) 微生物碳酸盐岩发育贯穿于整个地史时期;在中国中新元古界到第四系均有,但中新元古界至下奥陶统以其为主,中上奥陶统以新,微生物岩成为

表 3 表附菌和表附菌群落的形态分类( 据陈金勇<sup>[74]</sup> 2011)

Table 3 morphologic types of epiphyton and epiphyton thalli

类型	特征	形态★	微生物群落类型	特征	形态★
I 类 泥晶粗枝状	横切面为树枝状, 向上直立生长, 很少有分段; 菌体为泥晶方解石胶结, 直径约为 75 μm。其形成的微生物群落多为泥晶树枝状。		泥晶树枝状	在纵切面上, 呈树枝状或树丛状向上生长, 菌体周围泥晶方解石胶结, 通常具有成层性, 单个树枝最长可达 5 mm。	
II 类 泥晶分段枝状	横切面为树枝状, 向上直立生长, 具有较明显的分段; 菌体多为泥晶方解石胶结, 直径为 80 μm 左右。其形成的微生物群落为泥晶树枝状和单个房室状。		单个房室状	呈较短树枝状, 从内向外呈放射状, 房室为半圆形或不规则状, 直径约为 0.6~1.9 mm, 房室壁厚为 0.15~0.3 mm; 内壁较粗糙, 外壁较光滑。房室内为亮晶方解石胶结, 壁为泥晶方解石胶结。	
III 类 泥晶细枝状	横切面为较细的树枝状, 向上直立生长, 几乎没有分段; 菌体为泥晶方解石胶结, 直径为 40 μm 左右。其形成的微生物群落为单个房室状和簇球状, 少数为泥晶树枝状。		簇球状	主要由单个房室状相互聚集叠加而成的, 具有单向延展性和普遍的放射状生长。	
IV 类 微晶管状枝状	横切面为分叉的树丛状, 向四周生长, 没有分段; 菌体多位微晶方解石胶结, 直径小于 40 μm。其形成的微生物群落为簇球状, 少数为泥晶树枝状。		亮晶树枝状	在纵切面上, 呈树枝状或树丛状向上生长, 菌体为亮晶方解石胶结, 与后期的重结晶作用有关。	
V 类 亮晶粗枝状	横切面为树枝状, 向上直立生长, 基本没有分段; 菌体多位亮晶方解石胶结, 直径约为 75 μm。其形成的微生物群落为亮晶树枝状。				

★ 放大倍数大致相同, 标尺约为 300 μm。  
备注: 前四类与 Jnsun(2008)对附枝菌的分类相同。

次要的岩石类型,但在一些盆地也能成为主要储集岩石。

(2) 微生物碳酸盐岩岩石类型丰富,从微观结构看或从构筑微生物岩的基本成分看,主要有三种造岩方式:黏结和捕集作用、骨架生长作用和成屑作用。黏结和捕集作用是太古宇以来微生物造岩的主要沉积方式,形成以叠层石为代表的纹层状结构岩石类型。成屑作用主要形成球粒、凝块和核形石等微生物岩石的基本成分,它们既为叠层石提供基本成分,也可独自形成块状结构的岩石类型。造架作用以形成微观骨架结构的岩石类型为特征。三种造岩方式形成诸如叠层石、凝块石、核形石、枝状石(树枝石)等代表性的岩石类型,它们都有成为储层的可能。

(3) 微生物岩的宏观形态即是微生物群落的生态习性,也是环境作用的结果。如微生物群落以沉积底质或沉积物表面呈二维面状产出,形成微生物席,它是构成叠层纹层的最基本单元。若在特定环境下,微生物群落三维发育,小者形成球粒,大者形成宏观凝块。因此微生物岩的宏观结构(又称中观结构),即在肉眼观察的厘米至米级的尺度内显现出纹层构造和块状或斑块构造。如密集的微生物纹层形成的各类叠层石,稀疏纹层形成的层纹石。以球粒或凝块为基本组分形成以凝块和晶洞(或胶结物)组成的凝块构造。以微骨架生长组合形成大的骨架结构微生物岩。这是我们得以划分微生物岩类型的基础,更是

储层研究的根基。

(4) 微生物岩的孔隙系统与其内在的结构密切相关。微生物岩即与碎屑碳酸盐岩不同,也与大生物骨架碳酸盐岩不同。微生物岩有其独特的微观、宏观和巨观微生物沉积结构和构造。这就决定了其对储集岩内的原始孔隙有着不同的结构特征。微生物席的黏结和捕集作用形成以窗格孔为特征的原始孔隙系统;以成屑为主的微生物颗粒形成不规则的粒间孔隙体系;以造架为主的微生物岩则以形成架内窗格孔和架间的各类非均质的孔洞系统。

(5) 微生物碳酸盐岩的巨观形态至少可以有三种类型,即层状、穹状和礁块状。穹状在此指在层状地层中的小的圆形地形起伏状,相当于生物丘(bioherm),与常规碳酸盐岩巨观构造无异。微生物碳酸盐岩礁体规模差别大,大者如塔里木盆地柯坪断隆上的肖尔布拉克组的礁体可达 5 km<sup>2</sup>,起伏达 100 m 高;小者仅有数米。造礁微生物群落复杂多样,以沉积作用方式论,有三种;以微生物席为主的叠层石礁,如天津蓟县铁岭组厚达 180 m。以微观架状结构为主的塔里木苏盖特下寒武统肖尔布拉克组上段的微生物礁厚度可达 100 m,其第二期点礁厚可达 15 m。以凝块石和粘结微生物结合的礁规模也相当可观,如美国的阿拉巴马州近墨西哥湾地区的上侏罗一下白垩统多个凝块石礁体,高度达 60 m,面积达 2~6 km<sup>2</sup>,形成一个独立的油气藏。

(6) 微生物碳酸盐岩油气储层是我国下古生界和前寒武系的主要类型。从全球油气发现看微生物碳酸盐岩中的油气发现主要集中在前寒武如冈瓦纳大陆的非洲、阿拉伯板块,印度—巴基斯坦和澳大利亚,以及西伯利亚的里菲系。美国在侏罗—白垩系的凝块石礁中发现了油气。大规模的微生物岩储层多位于下古生界—前寒武系,与生命演化进程相对应。在塔里木盆地,中奥陶世以后,微生物在碳酸盐岩建造上起着配角角色,生物建隆的主角让位给了大的骨架生物,如托盘类和绿藻类。由此四川盆地、塔里木盆地、渤海湾盆地以及鄂尔多斯盆地的深部古老海相碳酸盐岩油气层将是微生物碳酸盐岩储层为主角的。虽然白云石化作用,岩溶作用和构造破裂作用将改善储层的性质,但是微生物岩的岩石结构和沉积构造是影响储层发育的基本要素。

## 5.2 微生物碳酸盐岩储层研究的展望

微生物碳酸盐岩储层研究将成为深部古老地层油气勘探重要的目的层。尽管对微生物碳酸盐岩的研究已历经200多年历史,但仍是一门吸引大批沉积学家和生物学家深入探索其中奥秘的一门学科。一是地球上生命的起源信息蕴含在古老的岩石纪录之中,而年代久远的强烈成岩作用,使这些微小生命体的化石纪录变化巨大,历史真相难以回溯。其二是现代沉积环境与太古宇、元古宇时代差别巨大,后者微生物占统治地位,形成了以其为主体的碳酸盐岩沉积。现今只能在极端环境中,如海底油气渗漏、热泉、酸泉、火山口湖、高盐水湖找到微生物沉积的存在,所以“将今论古”受到极大限制。尽管如此,对科学真理的追求仍吸引着大批科学家趋之若鹜。对于油气资源勘探开发而言,微生物碳酸盐岩的储层特征是最为关切的课题。因此,有几个基本问题需要深入研究。例如,在四川盆地灯影组中出现的泡沫绵层构造,属于哪一类微生物岩?蓟县出现的白齿碳酸盐岩,归于哪类的微生物岩。这些问题都要在不懈的努力研究中解决。

(1) 微生物碳酸盐岩中储层岩石命名问题。尽管 Riding 和其他科学家给出了命名方案,能否概括所有的微生物岩石类型,并适用于油气储层表征,值得进一步完善。

(2) 微生物储层孔隙的形成、类型、命名等,与经典的碳酸盐岩不同,能否将已有的这套术语照搬到微生物碳酸盐岩储层中或加以改造,仍需进一步厘定。

(3) 微生物碳酸盐岩储层规模和宏观表征问题。

这是沉积环境与微生物岩的沉积关系问题,即岩相与环境的对应关系,即有时代意义的沉积模式和普世的沉积模式建立问题。因此,需要进一步整理地质历史记录,研究微生物岩相类型的演化规律,建立对应的沉积模式。进一步建立不同时代的微生物的沉积模式以及有利储层发育相带的模式。

(4) 微生物碳酸盐岩中的白云岩问题。尽管提出了微生物作用直接沉淀白云石的观点。能否大面积形成白云岩,或是否大面积分布的白云岩都与微生物作用有关?环境在微生物白云石沉积过程中扮演了什么样的角色,仍然需要大量的研究工作落实。

(5) 微生物碳酸盐岩的相序结构应是沉积环境有序变化的结果。不同时代的微生物群落对应的岩相相序应有其共性,更有其特点。这种相序结构对储层段的识别显得重要,目前积累的资料有限,需要针对各个时代的微生物岩总结规律。

(6) 储层表征问题。对于微生物岩形成的储层,在不同级次上都有储层表征问题,对油气藏的开发显得十分重要。

总之微生物碳酸盐岩是既古老又新颖的研究课题。目前正值深层油气勘探开发的不断推进,为深化这方面研究提供了机遇。

致谢 作者首先感谢中国石油勘探开发研究院设立院级创新基金,使得研究工作得以开展。感谢沉积学报这次的邀请,促使这方面的研究心得得以快速发表。感谢塔里木油田研究院和本单位的同事给予的大力支持和提供的方便。感谢我的多届研究生所作的努力。如张兴阳、刘伟、张静、周刚、陈文玲、饶红娟、陆朋朋、翟秀芬和王鑫。

## 参考文献 (References)

- 1 Burne R V, Moore L S. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities [J]. *Palaios*, 1987, 2: 241-254
- 2 Riding R. Classification of microbial carbonates [M]. In: *Calcareous Algae and Stromatolites*. Springer-Verlag, Berlin (Ed. by R. Riding), 1991: 21-51
- 3 Riding R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms [J]. *Sedimentology*, 2000, 47 (Suppl. 1): 179-214
- 4 Riding R. Microbial carbonate abundance compared with fluctuations in metazoan diversity over geological time [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 185: 229-238
- 5 Riding R. The Nature of Stromatolites: 3 500 Million Years of History and a Century of Research [M]. In Reiter J *et al.* 1 (eds), *Advances in Stromatolite Geobiology*. Lecture Notes in Earth Science,

- Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2011a: 29-74
- 6 Riding R. Microbialites, stromatolites, and thrombolites [M]. In Reitner J and Thiel V (eds), Encyclopedia of Geobiology. Encyclopedia of Earth Science Series, Springer, Heidelberg, 2011b: 635-654
  - 7 Ahr. Microbial carbonate facies and reservoirs [R]. 2009
  - 8 Aitken J D. Classification and environmental significance of cryptalgal limestones and dolomites, with illustrations from the Cambrian and Ordovician of southwest Alberta [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1967(37): 1163-1178
  - 9 Awramik S M, Margulis L. Stromatolite [J]. Newsletter, 1974, 2: 5
  - 10 Braga J C, Martin J M, Riding R. Controls on microbial dome fabric development along a carbonate-siliciclastic shelf-basin transect, Miocene, SE Spain [J]. Palaios, 1995, 10: 347-361
  - 11 Herrero A, Flores E. The Cyanobacteria: Molecular Biology, Genomics and Evolution [M]. UK: Caister Academic Press, 2008: 484
  - 12 Whitton B A, Potts M. The Ecology of Cyanobacteria, their Diversity in Time and Space [M]. Dordrecht: Kluwer, 2000: 669
  - 13 Scholle P A, Ulmer-Scholle D S. A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis [M]. The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, U. S. A., 2003
  - 14 Kennard J M, James N P. Thrombolites and stromatolites: two distinct types of microbial structures [J]. Palaios, 1986, 1: 492-503
  - 15 Leinfelder R R, Schmid D U. Mesozoic reefal thrombolites and other microbolites (in Microbial sediments) [J]. Springer, Berlin, Federal Republic of Germany, 2000: 289-294
  - 16 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 Sedimentology Sinica, 2003, 21(1): 96-105]
  - 17 梅冥相. 从凝块石概念的演变论微生物碳酸盐岩的研究进展 [J]. 地质科技情报, 2007, 26(6): 1-9 [Mei Ming-xiang. Discussion on advances of microbial carbonates from the terminological change of thrombolites [J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(6): 1-9]
  - 18 韩作振, 陈吉涛, 迟乃杰, 等. 微生物碳酸盐岩研究: 回顾与展望 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4): 30-38 [Han Zuozhen, Chen Jitao, Chi Naijie, et al. Microcarbonates: a review and perspectives [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(4): 30-38]
  - 19 戴永定, 陈孟毅, 王尧. 微生物岩研究的发展和展望 [J]. 地球科学进展, 1996, 11(2): 209-215 [Dai Yongding, Chen Mengyi, Wang Yao. Development and perspective of research for microbolites [J]. Advance in earth sciences, 1996, 11(2): 209-215]
  - 20 Walcot C D. Cambrian geology and palaeontology III No. 2-precambrian, Algonkian algal flora [J]. Smithsonian. Miscellan. Collect. 1914, 64: 44-156
  - 21 Awramik S M. Precambrian columnar stromatolite diversity: reflection of metazoan appearance [J]. Science, 1971(174): 825-827
  - 22 Walter M R. Introduction [M]. In M. R. Walter, Ed. Stromatolites, Elsevier Publishing Co., Amsterdam, 1976: 1-4
  - 23 Zhang Y, Hoffmann I. Blue-green algal mats of the salinas in Sanya, Hainan Island (China): Structure, taxonomic composition and implications for the interpretation of Precambrian stromatolite [J]. Precambrian Research, 1992, 56: 275-290
  - 24 Allwood A C, Walter M R, Kamber B S, et al. Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia [J]. 2006
  - 25 Logan B W, Rezak R, Ginsburg R N. Classification and environmental significance of algal stromatolites [J]. Journal of Geology, 1964, 72(1): 68-83
  - 26 曹瑞骥, 袁训来. 中国叠层石研究进展 [J]. 古生物学报, 2009, 48(3): 314-321 [Cao Ruiji, Yuan Xunlai. Advances of stromatolites study in China [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 48(3): 314-321]
  - 27 Grotzinger J P, James N P. Carbonate Sedimentation of Precambrian World [M]. SEPM Special Publication 65. (see introduction-Grotzinger, J. P. and James, N. P. Precambrian Carbonates: evolution of understanding), 2000: 1-20
  - 28 Soja C M. Significance of Silurian stromatolite-sphinctiozoan reefs [J]. Geology, 1994, 22: 355-358
  - 29 Webb G E. Was Phanerozoic reef history controlled by the distribution of non-enzymatically secreted reef carbonates (microbial carbonate and biologically induced cement)? [J]. Sedimentology, 1996, 43(6): 947-971
  - 30 曹隽, 刘建波, 江崎洋一, 等. 安徽东至早奥陶世红花园组生物礁: 奥陶纪生物大辐射前的微生物礁 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(2): 279-288 [Cao Jun, Liu Jianbo, Ezaki Yoichi, et al. Lower ordovician reefs in the Honghuayuan Formation at Dongzhi, Anhui: microbial reefs just prior to the ordovician biodiversification [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis On Line First, 2009, 45(2): 279-288]
  - 31 Shen B, Xiao S, Chuanming Z, et al. A possible frondose Ediacaran fossil from Neoproterozoic bituminous limestone of the Dengying Formation; its body plan, lifestyle, and taphonomy [C] (in Geological Society of America, 2004 annual meeting, Anonymous). Geological Society of America 2004, 36(5): 521
  - 32 Awramik S M. The history and significance of stromatolites [M]: In Early organic evolution: implications for mineral and energy resources. Springer-Verlag, Berlin, Federal Republic of Germany 1992: 435-449
  - 33 Riding R, Liang L. Geobiology of microbial carbonates: metazoan and seawater saturation state influences on secular trends during the Phanerozoic [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 219: 101-115
  - 34 Andres M S, Reid R P. Growth morphologies of modern marine stromatolites; a case study from Highborne Cay, Bahamas [M]: In Microbialites and microbial communities; biological diversity, biogeochemical functioning, diagenetic processes, tracers of environmental changes. Sedimentary Geology 2006, 185(3-4): 319-328
  - 35 朱士兴. 中国叠层石 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1993 [Zhu Shixing. China stromatolites [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1993]

- 36 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 , 2002
- 37 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: 8 [Wang Xingzhi, Liu Zhongxuan. The main influential factor of reservoir space in Dengying Formation, Sinian System at Ziyang area of Sichuan Basin [M]. Advance of Sedimentology and palaeogeography. Petroleum Industry Press, 1995: 8]
- 38 王兴志,黄继祥,侯方浩. 四川资阳及邻区震旦系灯影组储层段沉积及层序地层学特征 [J]. 西南石油学院学报, 1996, 18(3): 1-9 [Wang Xingzhi, Huang Jixiang, Hou Fanghao. Characteristics of deposition and sequence stratigraphy of reservoir interval in Sinian Dengying Formation in Ziyang and its neighbouring area [J]. Journal of Southwestern Petroleum Institute, 1996, 18(3): 1-9]
- 39 Mancini E A , Lina's J C L , Parcell W C , *et al.* Upper Jurassic thrombolite reservoir play , northeastern Gulf of Mexico [J]. The American Association of Petroleum Geologists , 2004 , 88(11) : 1573-1602
- 40 Narbonne G M , James N P. Mesoproterozoic deep-water reefs from Borden Peninsula , Arctic Canada [J]. Sedimentology , 1996 , 43(5) : 827-848
- 41 钱迈平. 苏、皖北部震旦纪叠层石及其沉积环境学意义 [J]. 古生物学报, 1991 30(5) : 616-629 [Qian Maiping. Sinian stromatolites in northern Jiangsu and Anhui Province and its sedimentary environmental significance [J]. Acta Palaeontologica Sinica , 1991 , 30(5) : 616-629]
- 42 James N P , Dalrymple R W. Facies and models [M]. Canadian Sedimentary , 2010
- 43 Guhey R , Sinha D , Tewari V C. Meso-Neoproterozoic stromatolites from the Indravati and Chhattisgarh basin , central India [M]: In V. Tewari and J. Seckbach( eds) . Stromatolite: interaction of microbes with sediments. Springer Dordrecht Heidelberg London New York , 2011: 23-42
- 44 余家仁,樊哲仁. 任丘古潜山袖田碳酸盐岩储层研究 [J]. 石油学报, 1981 2(1) : 57-70 [Yu Jiaren , Fan Zheren. Renqiu buried hill carbonate reservoir research [J]. Acta Petrlei Sinica , 1981 , 2(1) : 57-70]
- 45 余家仁,雷怀玉,刘趁花. 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 Chenhua. A discussion of factors influencing marine carbonate rock reservoir development: a case study of Wumishan Formation of Renqiu Oilfield [J]. Marine Origin Petroleum Geology , 1998 , 3(1) : 39-48]
- 46 Hofmann H J. Stromatolites; Characteristics and Utility [J]. Earth-Science Reviews , 1973 , 9(4) : 339-373
- 47 Walter M R , Heys G R. Links between the rise of the Metazoa and the decline of stromatolites ( in Stratigraphic methods as applied to the Proterozoic record) [J]. Precambrian Research , 1985 , 29(1-3) : 149-174
- 48 Pratt B R. Stromatolite decline-A reconsideration [J]. Geology , 1982 , 10: 512-515
- 49 Kobluk D R , Crawford D R. A modern hypersaline organic mud-and gypsum-dominated basin and associated microbialites [J]. Palaios , 1990 , 5: 134 -148
- 50 曹仁关. 西南地区震旦纪叠层石、核形石和变形石 [J]. 中国地质科学院院报天津地质矿产研究所分刊, 1980 , 1(1) : 91-101 [Cao Renguan. Stromatolites , oncolithes and catagraphes of the Sinian System in Southwestern China [J]. Acta Geoscientia Sinica , 1980 , 1(1) : 91-101]
- 51 Aitken J D , Narbonne G M. Two occurrences of Precambrian thrombolites from the Mackenzie Mountains , northwestern Canada [J]. Palaios , 1989 , 4: 384 -388
- 52 Awramik S M , Riding R. Role of algal eukaryotes in subtidal columnar stromatolite formation. Proc [J]. Natl. Acad. Sci. USA , 1988 , 85: 1327-1329
- 53 Feldmann M , McKenzie J A. Stromatolite-thrombolite associations in a modern environment , Lee Stocking Island , Bahamas [J]. Palaios , 1998 , 13: 201-212
- 54 Ezaki Y , Liu J B , Adachi N. Earliest Triassic Microbialite Micro-to Megastructures in the Huaying Area of Sichuan Province , South China: Implications for the Nature of Oceanic Conditions after the End-Permian Extinction [J]. Palaios , 2003 , 18: 388 -402
- 55 吴亚生,何顺利,卢涛,等. 长庆中部气田奥陶纪马家沟组储层成岩模式与孔隙系统 [J]. 岩石学报, 2006 22(8) : 2171-2181 [Wu Yasheng , He Shunli , Lu Tao , *et al.* Diagenetic patterns and pore systems of the Lower Ordovician Majiagou Formation reservoirs of the central Changqing gas fields [J]. Acta Petrologica Sinica , 2006 , 22(8) : 2171-2181]
- 56 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 [Li Guoyu. Investigation on China Sinian system oil & gas prospects by referring to old stratigraphy of eastern Siberia [J]. Marine Origin Petroleum Geology , 2006 , 11(3) : 1-3]
- 57 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 , March , 10-13
- 58 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. AAPG Annual Convention , Dallas , Texas , 2004 , April , 18-21
- 59 Wright P V , Racey A. Pre-salt microbial carbonate reservoirs of the Santos basin , offshore Brazil [C]. AAPG Annual Convention and Exhibition , Denver , Colorado , 2009 , June , 7-10
- 60 Mancini E A , Llinas J C , Parcell W C , *et al.* Upper Jurassic thrombolite reservoir play , northeastern Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin , 2006 , 88: 1573-1602
- 61 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]. Experimental Petroleum Geology , 1992 , 14(2) : 125-134]

- 62 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聚集性 [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]
- 63 叶德胜. 塔里木盆地北部寒武—奥陶系碳酸盐岩的深部溶蚀作用 [J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 66-71 [Ye Desheng. Deep dissolution of Cambrian-Otdovician carbonates in the northern Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(1): 66-71]
- 64 王小林, 胡文瀾. 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, NWChina [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(10): 1479-1494]
- 65 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 Sinurian dolostone in eastern Tarim Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2008, 30(5): 27-31]
- 66 王兴志, 穆曙光, 方少仙, 等. 四川盆地西南部震旦系白云岩成岩过程中的孔隙演化 [J]. 沉积学报, 2000, 18(4): 549-554 [Wang Xingzhi, Mu Shuguang, Fang Shaoxian, et al. Evolution of porosity in the process of Sinian dolostone diagenesis in southwest Sichuan [J]. 2000, 18(4): 549-554]
- 67 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 Zhejin, Liang Ping, Wang Yong, et al. Geochemical characteristics and genesis of graptolite in Sinian Dengying Formation in south-eastern Sichuan Basin [J]. Acta Petrological Sinica, 2011, 27(8): 2263-2271]
- 68 唐泽尧, 孔金祥. 威远气田震旦系储层结构特征 [J]. 石油学报, 1984, 5(4): 43-53 [Tang Zeyao, Kong Jinxiang. Structural characteristics of Sinian reservoirs in Weiyuan Gas Field, Sichuan [J]. Acta Petroli Sinica, 1984, 5(4): 43-53]
- 69 余家仁, 潘祖荫. 任丘油田雾迷山组碳酸盐岩储层与非储层划分标准 [J]. 石油天然气地质, 1986, 7(1): 68-74 [Yu Jiaren, Pan Zuyin. Division criterion between carbonate reservoir and non-reservoir in the Wumishan Formation of Renqiu Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 1986, 7(1): 68-74]
- 70 赵树栋, 等编著. 任丘碳酸盐岩油藏 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 3-35 [Zhao Shudong, et al. Renqiu carbonate reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 3-35]
- 71 赵澄林. 华北中新元古界油气地质与沉积学 [M]. 北京: 地质出版社, 1996: 217-231 [Zhao Chenglin. Middle-Upper proterozoic geology and sedimentology in Northern China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 217-231]
- 72 梅冥相. 华北寒武系二级海侵背景下的沉积趋势及层序地层序列: 以北京西郊下苇甸剖面为例 [J]. 中国地质, 2011, 38(2), 317-337 [Mei Mingxiang. Depositional trends and sequence-stratigraphic successions under the Cambrian second-order transgressive setting in the North China Platform: a case study of the Xiaweidian section in the western suburb of Beijing [J]. Geology in China, 2011, 38(2): 317-337]
- 73 常玉光, 黄华州, 郑伟, 等. 河南华北型寒武系馒头组微生物岩沉积特征研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(2): 236-242 [Chang Yuguang, Huang Huazhou, Zhang Wei, et al. Sedimentary characteristics of microbialites of the North China type in Mantou Formation Cambrian, Henan [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(2): 236-242]
- 74 陈金勇. 鲁西寒武系凝块石灰岩特征及沉积环境分析 [D]. 山东科技大学, 2011 [Chen Jinyong. The characteristics and sedimentary environment analysis of thrombolite of Cambrian in Luxi Block, China [D]. Shandong University of Science and Technology, 2011]
- 75 迟乃杰. 鲁西寒武系核形石灰岩特征与沉积环境分析 [D]. 山东科技大学, 2011 [Chi Naijie. Characteristic and sedimentary environments of the Cambrian oncolites in Shandong Province, China [D]. Shandong University of Science and Technology, 2011]
- 76 韩作振, 陈吉涛, 张晓蕾, 等. 鲁西寒武系第三统张夏组附枝菌与附枝菌微生物灰岩特征研究 [J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1097-1103 [Han Zuozhen, Chen Jitao, Zhang Xiaolei, et al. Characteristics of Epiphyton and Epiphyton Microbialites in the Zhangxia Formation (Third Series of Cambrian), Shandong Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(8): 1097-1103]

## Review and Prospectives of Microbial Carbonate Reservoirs

LUO Ping<sup>1</sup> WANG Shi<sup>1</sup> LI Peng-wei<sup>2</sup> SONG Jin-min<sup>3</sup> JIN Ting-fu<sup>3</sup> WANG Guo-qian<sup>3</sup> YANG Shi-sheng<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083;

2. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083; 3. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

**Abstract:** Microbial carbonates are important oil & gas reservoir rocks, as well as the main rock types in China old strata. Microbial carbonates can be divided into stromatolites, thrombolite, dendrolite and other two types. The reservoir pore systems are closely related to microbialite sedimentary process, and mostly affected by structures and textures of microbialites. Framework and fenestral vugs are the main types of reservoir space. From Middle-Neo Proterozoic to Mesozoic, microbial carbonates reservoirs are discovered globally in various oil & gas fields, so that their petroleum resource potential is great. The researches on rock types, lithofacies texture, depositional models and favorable facies zones of microbial reservoir, are well worth deep study in future.

**Key words:** microbialites; carbonate reservoir; stromatolites thrombolite; microbial mats