

# 塔里木盆地西北缘震旦系奇格布拉克组 微生物白云岩发育特征及储集意义

杨翰轩<sup>1,2,3</sup>, 沈安江<sup>2,3</sup>, 郑剑锋<sup>2,3</sup>, 胡安平<sup>2,3</sup>

1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油杭州地质研究院;

3 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室

**摘要** 塔里木盆地震旦系奇格布拉克组发育一套厚层微生物白云岩,对其微生物岩类型、分布规律和储层成因等方面的认识仍不清楚。基于野外剖面实测及薄片观察,对该套白云岩的发育特征及油气储集意义进行了研究。奇格布拉克组发育规模不等的多种类型微生物白云岩,包括叠层石白云岩、凝块石白云岩、泡沫绵层石白云岩及与微生物相关颗粒白云岩,以微生物丘和微生物白云岩坪建造的形式产出。奇格布拉克组由 SQ<sub>1</sub> 和 SQ<sub>2</sub> 2 个三级层序构成,不同沉积建造发育于层序格架内的特定阶段:微生物丘主要发育于三级层序的 TST 和 HST 早期,微生物白云岩坪则主要发育于三级层序的 HST 中晚期;叠层石白云岩集中发育于 SQ<sub>1</sub>,环境条件的改变导致 SQ<sub>2</sub> 以发育泡沫绵层石白云岩为主。奇格布拉克组微生物白云岩储层具有相控性,位于向上变浅旋回顶部的丘坪和微生物白云岩坪是储层发育的有利相带。泡沫绵层石白云岩发育多种类型孔隙,纵向上频繁叠置、累计厚度大,横向上分布稳定,是奇格布拉克组储集性能最好的储集岩,具备成为规模优质储层的潜力。

**关键词** 微生物白云岩; 微生物白云岩坪; 奇格布拉克组; 震旦纪; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

## 0 前言

微生物碳酸盐岩是油气勘探的新领域、新热点。近年来,东西伯利亚、阿曼盐盆、北非、中亚、美国阿拉巴马州及巴西桑托斯盆地均在微生物碳酸盐岩中取得重大勘探突破<sup>[1-6]</sup>。据统计,东西伯利亚里菲系的微生物碳酸盐岩储集了本区69%的油和64%的气,美国阿拉巴马州Little Cedar Creek油田近50%的储量储存于上侏罗统凝块石礁中,而全球微生物碳酸盐岩探明油气储量累计已达134×10<sup>8</sup> t油当量<sup>[7-8]</sup>。微生物碳酸盐岩也广泛分布于我国华北地区、四川盆地和塔里木盆地,是古老海相碳酸盐岩地层中的主要岩石类型<sup>[9]</sup>。华北地区和四川盆地已在微生物白云岩中取得重大油气发现<sup>[8,10-11]</sup>。塔里木盆地震旦系奇格布拉克组同样发育一套厚层微生物白云岩,并且其上下紧邻寒武系玉尔土斯组烃源岩和南华系潜在烃源岩<sup>[12-15]</sup>,野外露头可见大量沥青<sup>[16]</sup>,显示出这套地层广阔的勘探潜力。

目前针对上震旦统白云岩的勘探仍处于探索阶段,地质资料较为匮乏,盆地内仅有塔东2井、东探1井、星火1井和星火101井钻遇该套白云岩;由于盆地内部现今被沙漠覆盖,上震旦统白云岩仅少量出露于盆地周缘,包括西北缘的阿克苏—柯坪地区、西南缘的铁克里克地区和东北缘的库鲁克塔格地区<sup>[17-18]</sup>。目前有关上震旦统白云岩的研究程度仍较低,在成因、成储及成藏方面均面临着诸多科学问题。就成储方面而言,虽然前人对其地层展布范围及特征<sup>[16,19]</sup>、微生物岩类型<sup>[20-21]</sup>、沉积相类型<sup>[17,22]</sup>、储层特征<sup>[23-24]</sup>等开展过一些研究,但对微生物岩的分类、分布规律及储层成因等方面的认识仍不十分清楚,这制约了对储层分布的预测。目前,钻井揭示的上震旦统白云岩储层物性普遍较差<sup>[18,24]</sup>。本文在塔里木盆地西北缘野外剖面实测和薄片观察的基础上,厘清了奇格布拉克组微生物白云岩的类型及其在沉积环境和储层品质方面的差异,明确了层序格架下奇格布拉克组微生物白云岩的发育规律,并建立了基于缓坡背

收稿日期: 2019-05-29; 改回日期: 2019-08-09; 网络出版日期: 2020-03-03

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”项目下属课题“寒武系—中新元古界碳酸盐岩规模储层形成与分布研究”(编号: 2016ZX05004-002)、中石油科技项目“古老碳酸盐岩沉积环境与构造岩相古地理研究”(编号: 2019B-0405)联合资助

第一作者: 杨翰轩, 2013年获西南石油大学学士学位, 现为中国石油勘探开发研究院硕士研究生, 主要从事碳酸盐岩沉积储层研究。通信地址: 310023 浙江省杭州市西溪路 920 号; E-mail: yhx\_petrochina@163.com

景的微生物白云岩沉积模式,以期为盆地震旦系奇格布拉克组勘探提供参考。

## 1 区域地质概况

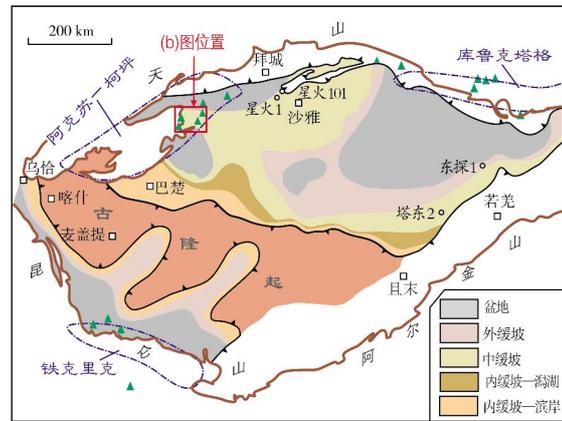
### 1.1 地质背景

塔里木盆地位于塔里木板块中部稳定区,是一个由古生界克拉通盆地和中生界—新生界前陆盆地组成的多旋回叠合含油气盆地,面积达 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,整体呈菱形<sup>[25]</sup>。南华纪,罗迪尼亚(Rodinia)超大陆的裂解导致塔里木盆地进入拉张裂谷演化阶段,前震旦纪结晶基底开始接受新元古代的盖层沉积<sup>[26]</sup>。早震旦世,随着驱动板块裂解的地幔柱活动趋于衰退,拉张作用逐渐减弱<sup>[27]</sup>。至晚震旦世,塔里木盆地在壳变冷、拉张变薄等因素影响下进入克拉通内拗陷期<sup>[28]</sup>, (中央)古隆起沿喀什—塔中—塔东南一线分布,以北的广大地区为碳酸盐缓坡,自南向北依次发育内缓坡、中缓坡、外缓坡和盆地相(图1a),并且在西北、西南和东北缘分别发育塔西北、塔西南和阿满3支裂陷,盆地内部总体呈现南高北低的古构造格局<sup>[16, 29]</sup>。其后,柯坪运动导致盆地经历广泛的抬升,塔中及塔西南的震旦系甚至剥蚀殆尽<sup>[18]</sup>。

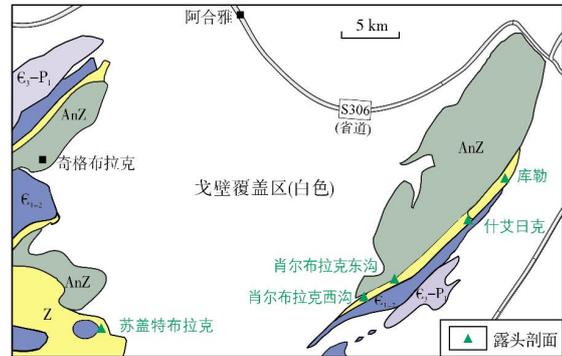
### 1.2 地层分区及地层序列

在盆地不同地层区内(图1),上震旦统的地层名称和岩石类型存在着显著差异:阿克苏—柯坪分区的上震旦统奇格布拉克组为一套微生物白云岩;铁克里克地区上震旦统克孜苏胡木组岩性以灰色、玫瑰色纹层状白云岩和泥质粉砂岩为主;塔东地区尉犁1井、东探1井及塔东1井揭示上震旦统水泉组相变为白云质灰岩、石灰岩或碎屑岩;而库鲁克塔格分区上震旦统自下而上分为水泉组和汉格乐乔克组,前者岩性主要为泥晶灰岩、泥质白云岩、泥粉晶白云岩,后者为冰碛岩沉积<sup>[18-19]</sup>。

目前盆地内仅有塔东和塔北的4口钻井揭示了上震旦统白云岩,野外露头研究则多以西北缘阿克苏—柯坪地区的数条剖面为对象(图1b)。在现今钻井揭示和露头显示的上震旦统白云岩中,以肖尔布拉克西沟剖面和什艾日克剖面最为完整典型,本文实测了肖尔布拉克西沟剖面,并观测什艾日克剖面。研究区奇格布拉克组为一套内缓坡—中缓坡相沉积,以发育微生物白云岩和颗粒白云岩为特征<sup>[17, 28, 30]</sup>。下伏下震旦统



(a) 奇格布拉克组岩相古地理平面图



(b) 研究区露头地层分布及剖面位置

图1 塔里木盆地震旦系奇格布拉克组岩相古地理及西北缘剖面位置

Fig. 1 Lithofacies paleogeography of the Sinian Qigebrak Formation and outcrop location of the northwest margin in Tarim Basin

苏盖特布拉克组以碎屑岩夹火山岩沉积为主,与奇格布拉克组呈平行不整合接触<sup>[19]</sup>。震旦纪末期,研究区在柯坪运动影响下整体抬升,在奇格布拉克组顶部形成了一套岩溶储集体<sup>[16]</sup>。寒武纪初期发生快速海侵,在奇格布拉克组之上沉积了玉尔吐斯组含磷黑色岩系。

根据露头层序分析识别出的2个主要暴露面,结合前人研究成果<sup>[18-19, 28]</sup>,将奇格布拉克组划分为2个三级层序(SQ<sub>1</sub>、SQ<sub>2</sub>)(图2)。SQ<sub>1</sub>的TST发育叠层石白云岩、颗粒白云岩与陆源碎屑岩互层,HST岩性以水平—微波状叠层石白云岩为主;SQ<sub>2</sub>的TST发育凝块石白云岩、泡沫绵层石白云岩和颗粒白云岩,HST岩性以泡沫绵层石白云岩为主,顶部发育岩溶风化壳。

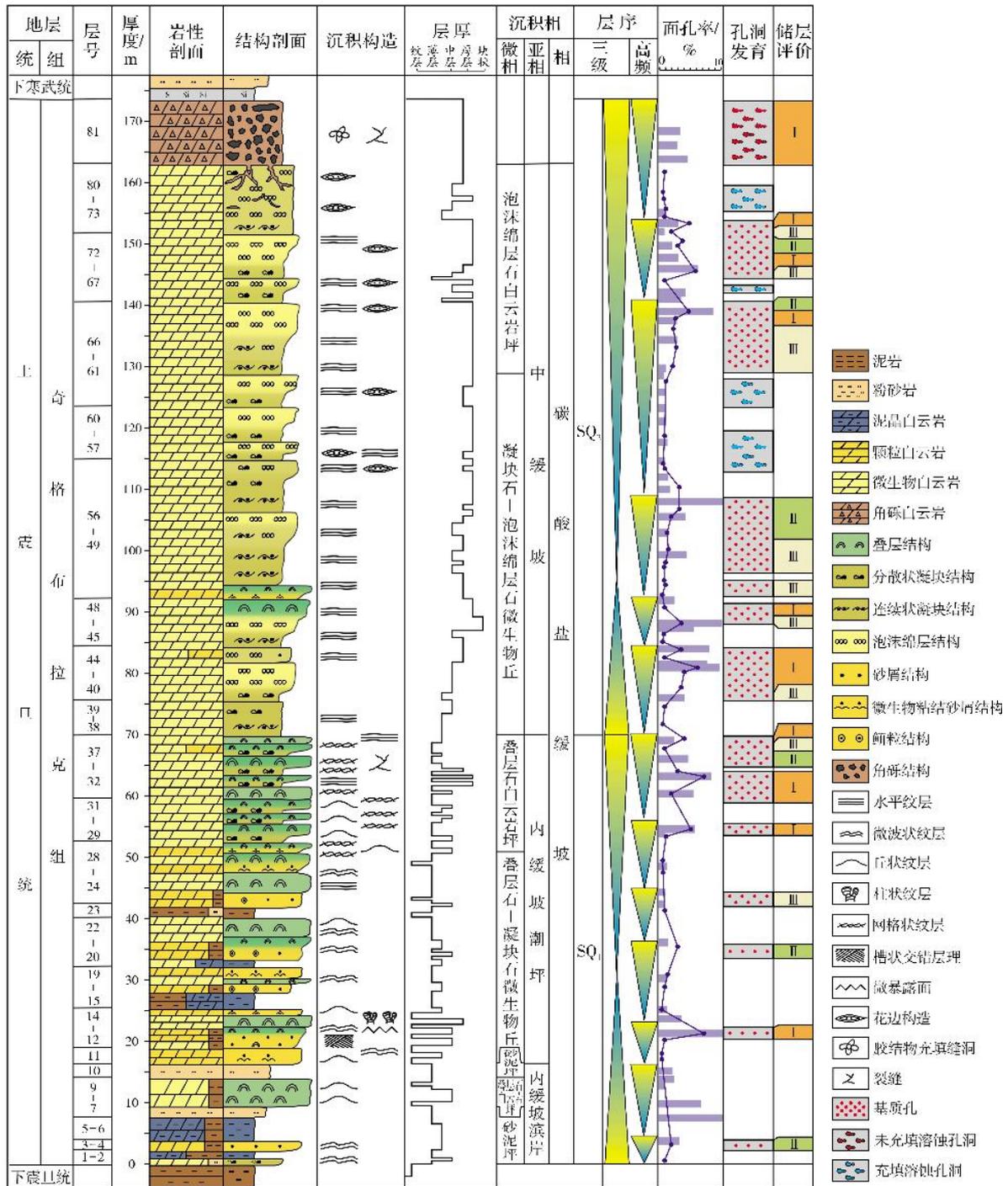


图2 塔里木盆地西北缘肖尔布拉克西沟剖面震旦系奇格布拉克组综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive histogram of the Sinian Qigebrak Formation of Xigou outcrop in Xiaerblak, northwest margin of Tarim Basin

## 2 微生物岩类型及特征

目前,关于微生物岩的分类方案众多,尚未达成统一的观点<sup>[31-32]</sup>。前人对奇格布拉克组微生物岩

类型开展过一些研究<sup>[20-21]</sup>,其过于细致的分类在应用于沉积储层研究时存在一定弊端;一方面不利于野外的识别对比;另一方面也无益于关联沉积相带,进而探讨储层分布规律。本文参考Riding<sup>[31]</sup>和

Shapiro<sup>[33]</sup>的分类方案,依据中型尺度结构将研究区微生物岩分为叠层石白云岩、凝块石白云岩、泡沫绵

层石白云岩及与微生物相关颗粒白云岩等(图3)4个大类以及若干亚类。

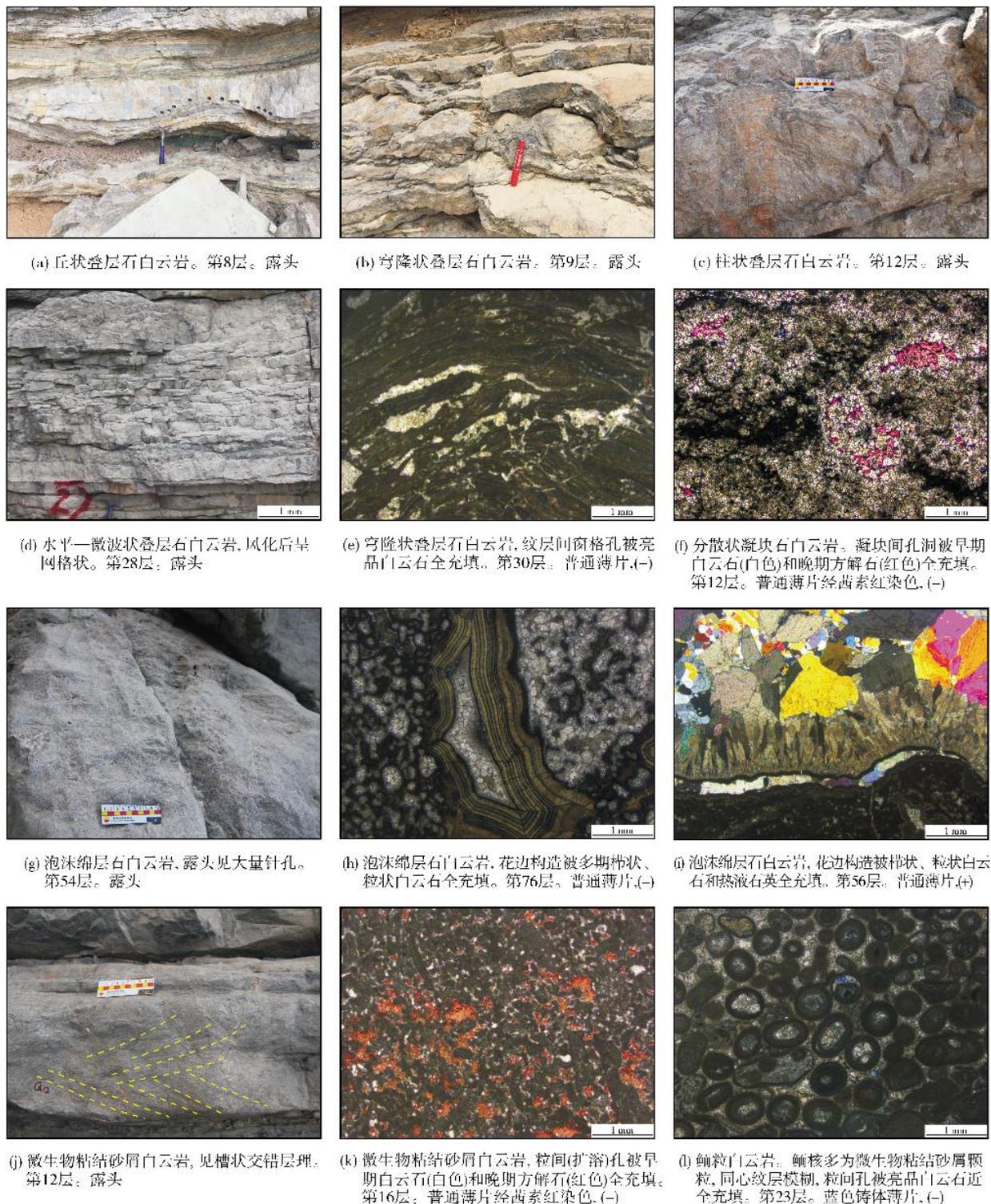


图3 塔里木盆地西北缘肖尔布拉克西沟剖面震旦系奇格布拉克组微生物白云岩类型

Fig. 3 Microbial dolomite types of the Sinian Qigebrak Formation of Xigou outcrop in Xiaerblak, northwest margin of Tarim Basin

## 2.1 叠层石白云岩

叠层石白云岩集中生长于奇格布拉克组SQ<sub>1</sub>,野外可见水平—微波状、丘状、穹隆状及柱状等多种形态类型(图3a—3c),SQ<sub>1</sub>顶部还可见水平—微波状叠层石,风化后呈“网格状”(图3d)。叠层石白云岩多呈灰色—深灰色薄—中层状,单层厚度一般不超过0.5 m。镜下见大量格架孔洞,可被亮晶白云石充填(图3e)。

前人研究表明:叠层石主要生长于潮间—浅潮下带,其形态特征与沉积环境密切相关<sup>[7,34]</sup>。丘状、穹隆状及柱状叠层石白云岩反映较强的水体能量,指示潮间带下部—浅潮下带环境,在垂向上集中分布于SQ<sub>1</sub>的TST,并位于向上变浅旋回的中下部。水平—微波状叠层石白云岩的平直纹层结构表明其形成于水动力较弱的潮间带上部,垂向上主要分布于SQ<sub>1</sub>的HST,位于向上变浅旋回的上部。

## 2.2 凝块石白云岩

凝块石白云岩宏观上多呈灰色中—厚层状,根据镜下观察,可分为分散状凝块石和连续状凝块石2类:前者暗色凝块呈块状,边界较为清晰,凝块结构较为典型(图3f),主要发育在SQ<sub>1</sub>内;后者的凝块内含泡沫绵层藻,凝块相互粘结,在宏观和微观上均表现出纹层结构,集中分布在SQ<sub>2</sub>内。

凝块石沉积水深多大于叠层石,属于浅潮下带的高能沉积<sup>[35]</sup>,是组成微生物丘丘核微相的重要岩石类型。其中,分散状凝块石受到一定波浪作用的改造,沉积环境能量强于连续状凝块石。凝块石白云岩在奇格布拉克组SQ<sub>1</sub>、SQ<sub>2</sub>中均有分布,但SQ<sub>2</sub>中凝块石的单层厚度及累计厚度均显著大于SQ<sub>1</sub>,在向上变浅旋回中主要位于中下部。

## 2.3 泡沫绵层石白云岩

泡沫绵层石白云岩宏观上呈灰白色厚层—块状,具有水平纹层结构,可见大量针孔和顺层状溶蚀孔洞(图3g)。镜下观察发现:泡沫绵层石由大量泡沫绵层藻组成,泡沫体呈圆形、不规则椭圆形和长条形,其体腔极其发育,但多被纤状和粒状白云石充填。泡沫绵层藻可紧密堆积呈蜂窝状(图3h),或在亮晶胶结物中呈漂浮状。顺层状溶蚀孔洞在镜下具有花边构造特征,由边缘一层至数层栉状白云石和中心粒状白云石构成(图3h),在奇格布拉克组上部的

花边构造内还可见鞍状白云石及石英(图3i)。

前人有关泡沫绵层石形成环境的观点可归纳为2种,分别为潮下带较高能环境<sup>[20,36-39]</sup>和潮间带—潮上带低能环境<sup>[40-41]</sup>。野外实测发现,泡沫绵层石白云岩集中发育于奇格布拉克组SQ<sub>2</sub>,宏观上多见水平纹层结构,垂向上往往分布于颗粒白云岩、凝块石白云岩之上;镜下观察发现仅少量具备似微生物凝块的抗浪格架。故认为其形成于潮下—潮间带内。

## 2.4 与微生物相关颗粒白云岩

微生物粘结砂屑白云岩在野外露头呈灰色—深灰色薄—中层状,见槽状交错层理发育(图3j)。镜下观察发现:部分微生物粘结砂屑颗粒内可见微生物粘结纹层,颗粒间发育粒间孔及粒间溶孔,多被早期亮晶白云石和晚期方解石全充填(图3k)。

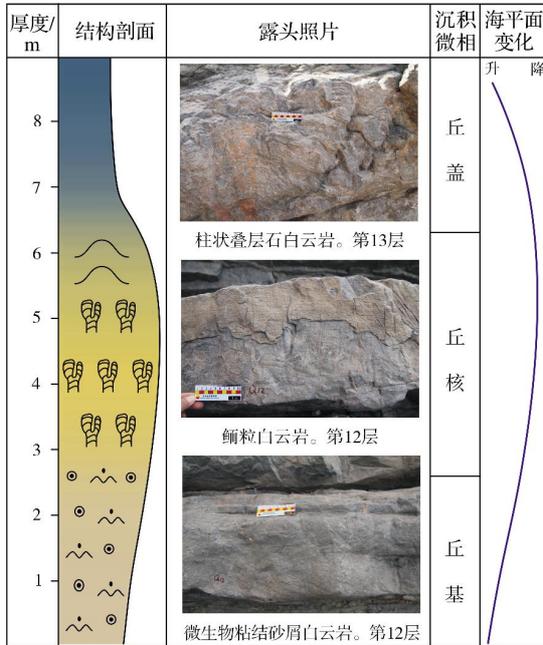
鲕粒白云岩宏观上同样呈灰色—深灰色薄—中层状。鲕粒多以微生物粘结砂屑为核,同心纹层较模糊,粒间孔被栉状、粒状亮晶白云石近全充填(图3l)。

以上2类与微生物相关颗粒白云岩在镜下颗粒结构清晰,指示水体能量较强的浅潮下带。颗粒白云岩主要发育于SQ<sub>1</sub>,并位于向上变浅旋回的底部。

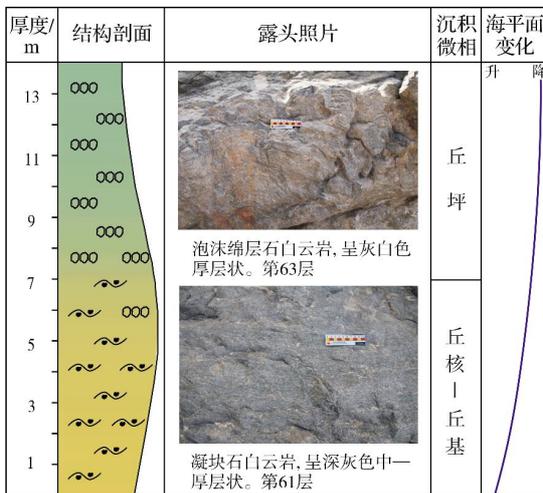
## 3 纵向序列与发育规律

奇格布拉克组微生物建造的发育与波浪和潮汐作用密切相关,微生物群落在波浪和潮汐作用的影响下形成了多种微生物岩类型,并以微生物丘和微生物白云岩坪建造的形式产出(图4)。微生物丘在垂向上具有明显分段性,分为丘基、丘核、丘坪和丘盖。丘基位于微生物丘底部,主要发育与微生物相关颗粒白云岩,构成微生物丘发育的基底;丘核位于中部,主要发育凝块石白云岩、穹隆状叠层石白云岩及柱状叠层石白云岩等高能沉积,构成了微生物丘的主体;丘坪位于微生物丘向上变浅旋回的顶部,岩性以水平—微波状叠层石白云岩及泡沫绵层石白云岩为主,当微生物丘频繁叠置时丘坪也可作为新一个旋回的丘基;丘盖形成于海平面快速上升时期,由微生物纹层泥晶白云岩构成,覆于丘核之上。奇格布拉克组微生物丘大多表现出向上变浅的特征,如在SQ<sub>1</sub>内微生物丘具有丘基—丘核—丘盖的组合样式(图4a),而在SQ<sub>2</sub>内由于颗粒白云岩几乎不发育,丘坪直接覆于丘核之上而表现为丘核—丘坪的组合样式(图4b);SQ<sub>1</sub>可见少量向上变浅复变深的沉积序列

(图4a)。微生物白云岩坪呈层状,由水平—微波状叠层石白云岩和泡沫绵层石白云岩构成,发育水平纹层,垂向上分段性不明显。



(a) 沉积序列1



(b) 沉积序列2



图4 塔里木盆地西北缘肖尔布拉克西沟剖面震旦系奇格布拉克组微生物丘典型序

Fig. 4 Typical facies sequence of microbial mound of the Sinian Qigebrak Formation of Xigou outcrop in Xiaerblak, northwest margin of Tarim Basin

在单个三级层序中,微生物建造可形成于缓坡背景下层序演化的各个阶段,但在不同体系域内,微生物建造类型仍存在一定差异(图2)。在海侵期和高位域早期,微生物丘是奇格布拉克组主要的微生物建造类型。微生物丘厚度不等,具有自奇格布拉克组底部至顶部逐渐增大的趋势,最厚可达十多米。随着海平面不断上升,微生物丘在垂向上可多期叠置发育。微生物丘间发育微生物粘结砂屑滩和鲕粒滩,露头可见交错层理,但海平面的持续变化导致高能带不稳定,因而高能滩相沉积的发育程度十分有限。而在层序演化末期的高位域中—晚期,古地貌仍较平缓,微生物建造则以微生物白云岩坪为主,具有席状分布特征。肖尔布拉克西沟剖面微生物白云岩坪横向延伸范围较远,与什艾日克剖面奇格布拉克组2个三级层序顶部的微生物白云岩坪具有较好的对比性。受相对海平面下降影响, SQ<sub>1</sub>顶部的叠层石白云岩坪和 SQ<sub>2</sub>顶部的泡沫绵层石白云岩坪普遍遭到大气淡水淋滤作用,大量发育溶蚀孔洞。

构成奇格布拉克组的2个三级层序均大量发育微生物白云岩,但 SQ<sub>1</sub>和 SQ<sub>2</sub>中潮间环境发育的微生物岩类型却存在显著差异(图2)。类型多样的叠层石是 SQ<sub>1</sub>潮间环境中主要的微生物岩类型,其单层厚度薄,层间还发育大量粉砂岩沉积,指示其沉积环境总体位于潮间—潮上带。前人研究表明:该时期研究区正处于由大陆裂谷演化为被动大陆边缘的过渡期<sup>[26]</sup>,东南部发育的古陆为研究区提供了陆源碎屑<sup>[22]</sup>,而震旦纪缺氧、温暖、高碱度的海水又为微生物白云岩的发育创造了条件<sup>[42]</sup>。 SQ<sub>1</sub>下部叠层石白云岩的发育特征反映出研究区在该时期具有沉积水体浅、海平面停滞与动荡交互、陆地裸露、植被缺乏等特征<sup>[43]</sup>。 SQ<sub>2</sub>潮间环境发育的微生物岩内可见大量泡沫绵层藻,由其构成的泡沫绵层石白云岩与 SQ<sub>1</sub>内的叠层石白云岩差异明显。盆地整体沉降和相对海平面上升引起可容纳空间的增大,使得 SQ<sub>2</sub>单层厚度多在2 m以上;陆地面积大量减少致使陆源碎屑供应不足,因此在 SQ<sub>2</sub>的微生物白云岩内普遍未见石英颗粒;同时古海洋化学研究表明:奇格布拉克组从底至顶具有古海洋盐度逐渐减小而古温度逐渐增加的趋势, SQ<sub>1</sub>和 SQ<sub>2</sub>之间平均古海洋盐度 Z 值的差值达 5.2,而平均古温度的差值达 3.5 °C<sup>[44]</sup>。沉积水体深度、陆源碎屑供应以及古气候、古海洋化学等环境条件的变迁可能导致占主导地位的造岩微生物种群发生改

变,从而造成 $\text{SO}_2$ 潮间带环境中叠层石的衰亡和泡沫绵层石的繁盛。

#### 4 沉积模式

前人关于岩相古地理的研究表明:奇格布拉克组沉积时期,阿克苏—柯坪地区主体位于中缓坡相带内(图1)<sup>[19,29]</sup>,阿克苏以南出露的各条剖面均大量发育内缓坡—中缓坡相的颗粒白云岩和微生物岩,向北相变为外缓坡。不同沉积微相内的微生物岩类型与沉积水体的深度和水体能量有着直接关系,因此微生物岩的分布存在一定的分带性。

$\text{SO}_2$ 沉积时期,研究区正常浪基面以上主要发育

水平—微波状、丘状、穹隆状叠层石白云岩,古陆的影响导致其还富含石英颗粒。位于正常浪基面和风暴浪基面之间的高能带具有最强的水体能量,发育的微生物岩类型包括柱状叠层石白云岩、凝块石白云岩、微生物粘结砂屑白云岩和鲕粒白云岩。风暴浪基面之下以发育微生物纹层泥晶白云岩和泥晶白云岩为主。 $\text{SO}_2$ 沉积时期,正常浪基面以上沉积的微生物岩类型由叠层石白云岩转变为泡沫绵层石白云岩,并且不再受到陆源碎屑的影响。高能带以凝块石白云岩和微生物粘结砂屑白云岩为主,不再发育柱状叠层石白云岩和鲕粒白云岩。基于上述认识,建立本区奇格布拉克组基于缓坡背景的微生物白云岩沉积模式(图5)。

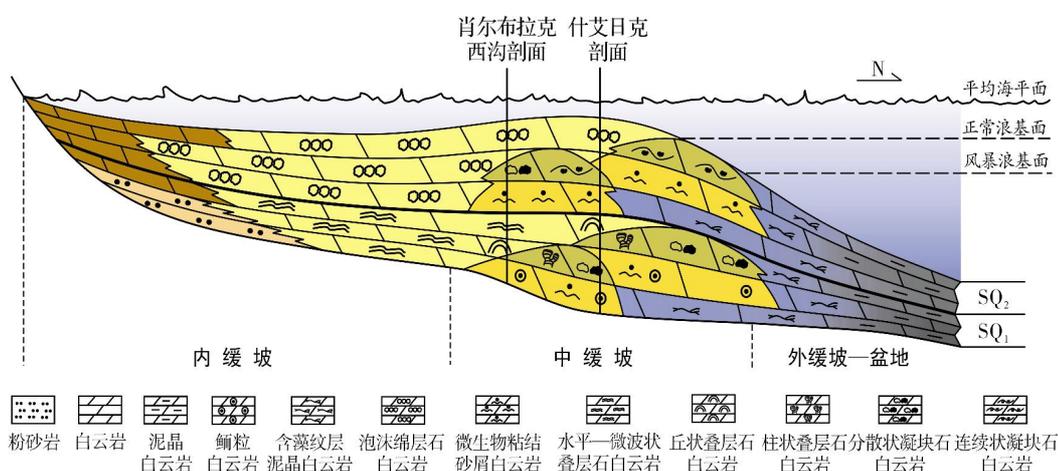


图5 塔里木盆地西北缘震旦系奇格布拉克组微生物白云岩沉积模式

Fig. 5 Microbial dolomite sedimentary model of the Sinian Qigebrak Formation of northwest margin of Tarim Basin

奇格布拉克组沉积时期,虽然肖尔布拉克西沟剖面和什艾日克剖面主体均位于中缓坡相带内,但由于所处的古地理位置有所差异,导致其沉积物也有所差别。相比于肖尔布拉克西沟剖面,什艾日克剖面位置更靠近外缓坡带而远离古陆,因此什艾日克剖面奇格布拉克组底部几乎不发育陆源碎屑岩,而高能滩相沉积的厚度大于肖尔布拉克西沟剖面。

#### 5 储集意义

近年来的现代沉积考察及勘探实践均证实:微生物碳酸盐岩具有极高的原始孔隙度(最高达50%以上)和作为优质储集层的潜力<sup>[45-46]</sup>,储集空间以微生物丘滩体中颗粒和凝块间的孔洞为主<sup>[47-48]</sup>。野外和镜下观察发现,奇格布拉克组发育微生物白云岩储层和岩溶储层。

#### 5.1 微生物白云岩储层

奇格布拉克组微生物白云岩储层发育了残余格架孔、残余粒间孔、粒内溶孔、泡沫绵层体腔孔以及花边构造残余孔等5类孔隙(图6)。

**残余格架孔** 该类孔隙是对原始格架孔洞的继承、调整。微生物格架在形成初期存在大量原始孔洞,部分格架孔洞在地质演化过程中被胶结物充填而丧失储集性,但未被完全充填或经后期溶蚀改造的残余格架孔可作为油气储集空间。该类孔隙主要发育于叠层石纹层间(图6a)和凝块石、泡沫绵层石中(图6b),其孔径大小不等,多在0.1~1 mm范围内,面孔率可达6%。

**残余粒间孔** 发育于鲕粒间,是原生粒间孔未被完全充填的残余孔隙(图6c),孔径多小于0.2 mm,

面孔率约为2%。

**粒内容孔** 由微生物粘结砂屑和鲕粒在准同生期受大气淡水影响发生选择性溶蚀而形成,其孔径介于0.2~0.6 mm,面孔率可达7%以上。该类孔隙发育频率极低,仅见于第12层(图6d)。

**泡沫绵层体腔孔** 位于泡沫绵层藻内,泡沫体腔或被亮晶胶结物半充填,或无胶结物充填而表

现为铸模孔(图6e)。这类孔隙大小为0.1~0.3 mm,面孔率最高可达6%。

**花边构造残余孔** 花边构造广泛发育于研究区奇格布拉克组上部的泡沫绵层石中,从边缘至中心依次充填带状白云石、粒状白云石、鞍状白云石和石英(图3i),中心残余少量孔洞(图6e)。花边构造多呈长条形,大者长可达数厘米,面孔率较低,最高约为2%。

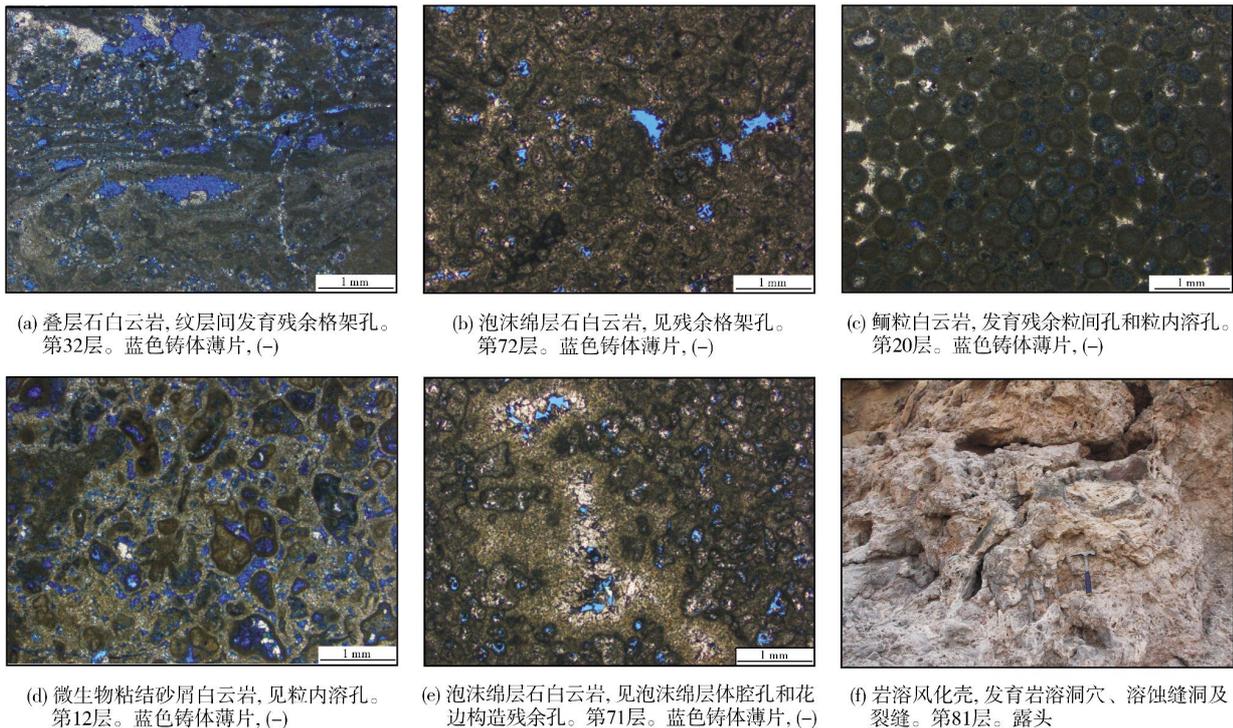


图6 塔里木盆地西北缘肖尔布拉克西沟剖面震旦系奇格布拉克组微生物白云岩储集空间类型

Fig. 6 Reservoir space types of microbial dolomite of the Sinian Qigebrak Formation of Xigou outcrop in Xiaerblak, northwest margin of Tarim Basin

奇格布拉克组微生物白云岩储层宏观上受相控作用明显,位于向上变浅旋回顶部的丘坪和微生物白云岩坪是储层发育的有利相带(图7a)。这些相带内的沉积物具备大量原始格架孔洞,并在准同生期大气淡水淋滤作用下,形成良好储层。特别是位于三级层序界面之下的微生物白云岩坪沉积,在相对海平面下降时经历了最为强烈的早表生孔隙改造事件,该相带内各种岩类平均孔隙度为2.23%~3.25%,最大孔隙度可达7%,是奇格布拉克组孔隙最发育的相带。

丘坪和微生物白云岩坪相带内的储集岩类型以水平—微波状叠层石白云岩和泡沫绵层石白云岩为主。水平—微波状叠层石白云岩主要发育于SQ<sub>1</sub>内,

且储层段集中于SQ<sub>1</sub>顶部的微生物白云岩坪沉积内;镜下可见大量纹层间的残余孔洞(图6a),个别面孔率区间占优势,非均质性强(图7b),但储层段的单层厚度小,累计厚度仅为数米。泡沫绵层石白云岩主要发育于SQ<sub>2</sub>内,储层段发育于向上变浅旋回的顶部,并以SQ<sub>2</sub>顶部微生物白云岩坪沉积的物性最佳,储层相对均质(图7b)。虽然接近SQ<sub>2</sub>顶部的泡沫绵层石白云岩坪受岩溶风化壳的影响,原始孔隙被一定程度地充填,但在SQ<sub>2</sub>内其单层厚度达数米,在纵向上频繁叠置,储层段累计厚度可达30余米,且在横向上分布稳定,与什艾日克剖面的SQ<sub>2</sub>具有良好的对比性,因此泡沫绵层石白云岩是奇格布拉克组储集性能最佳的岩石类型,具备成为规模性优质储层的潜力。

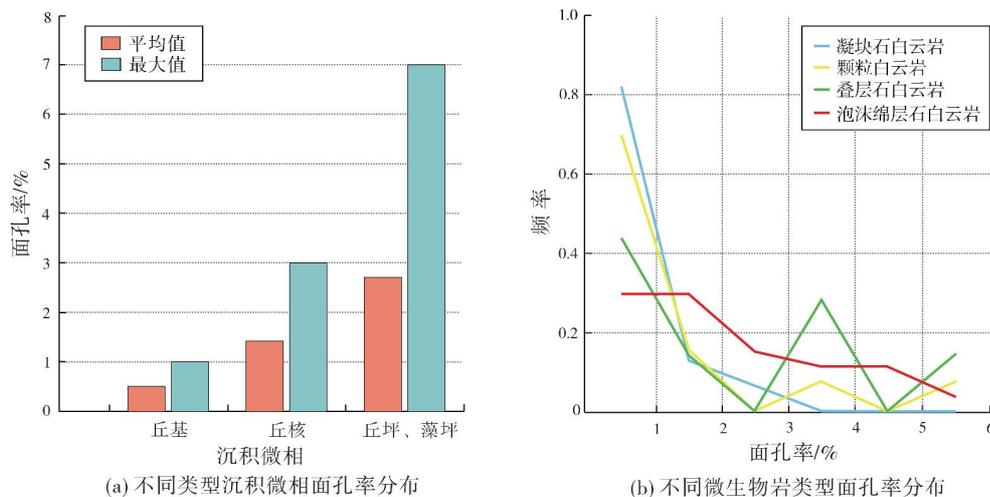


图7 塔里木盆地西北缘奇格布拉克组不同沉积微相和微生物岩类型的面孔率分布图

Fig. 7 Plane porosity histogram of different microfacies and plane porosity proportion diagram of different microbial rocks of the Sinian Qigebrak Formation of northwest margin of Tarim Basin

## 5.2 岩溶储层

研究区奇格布拉克组顶部的微生物白云岩遭受大气淡水淋滤形成岩溶储层,储集空间类型主要为岩溶洞穴、溶蚀缝洞及裂缝(图6f)。其中,岩溶洞穴内多被垮塌角砾半充填,角砾间残余孔隙空间;溶蚀缝洞内常发育胶结物,可见少量残留孔隙;裂缝显著提高了岩石的渗滤能力,受扩溶改造后也具备一定储集能力。震旦系顶部风化壳广泛发育于北部坳陷及以北广大区域,同时具备良好的储盖组合和油气充注条件<sup>[49]</sup>,是有利的油气勘探方向。

## 6 结论

(1)根据野外露头的实测和大量薄片的观察,塔里木盆地西北缘震旦系奇格布拉克组主要发育规模不等的各类微生物白云岩,依据中型尺度结构分为叠层石白云岩、凝块石白云岩、泡沫绵层石白云岩以及微生物相关颗粒白云岩,它们形成于内缓坡—中缓坡相带内的不同环境,并在垂向上构成微生物丘和微生物白云岩坪建造。

(2)奇格布拉克组由2个三级层序构成,沉积水体深度、陆源碎屑供应以及古气候、古海洋化学等环境条件的变迁导致占优势地位的造岩微生物种群发生改变。微生物丘建造主要发育于三级层序的TST和HST早期,随海平面上升在纵向上多期叠置,微生物

白云岩坪则主要发育于三级层序的HST中晚期; $SQ_1$ 以发育叠层石白云岩为主, $SQ_2$ 以发育泡沫绵层石白云岩为主。

(3)奇格布拉克组发育微生物白云岩储层和岩溶储层。微生物白云岩储层的发育具有相控性,位于向上变浅旋回顶部的丘坪和微生物白云岩坪是储层发育的有利相带,水平—微波状叠层石白云岩和泡沫绵层石白云岩是该相带内发育的主要储集岩类型。 $SQ_1$ 内的水平—微波状叠层石白云岩储层段的单层厚度和累计厚度均较小; $SQ_2$ 内的泡沫绵层石白云岩发育多种类型孔隙,纵向上频繁叠置、累计厚度大,横向上分布稳定,因此是奇格布拉克组储集性能最佳的岩石类型,具备成为规模性优质储层的潜力。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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(1/2): 1-28.
- [3] LOTTAROLI F, CRAIG J, THUSU B. Neoproterozoic-Early Cambrian(Infracambrian) hydrocarbon prospectivity of North Africa: a synthesis[M]//CRAIG J, THURLOW J, THUSUM B, et al. Global Neoproterozoic petroleum systems: the emerging potential in North Africa. Geological Society, London, Special Publications 326, 2009: 137-156.

- [4] KENTER J A M, HARRIS P M, PORTA G D. Steep microbial boundstone-dominated platform margins: examples and implications[J]. *Sedimentary geology*, 2005, 178(1/2): 5-30.
- [5] MANCINI E A, LLIANS J C, PARCELL W C, et al. Upper Jurassic thrombolite reservoir play, northeastern Gulf of Mexico [J]. *AAPG bulletin*, 2004, 88(11): 1573-1602.
- [6] REZENDE M F, POPE M C. Importance of depositional texture in pore characterization of subsalt microbialite carbonates, offshore Brazil [M]//BOSENCE D W J, GIBBONS K A, LE HERON D P, et al. *Microbial carbonates in space and time: implications for global exploration and production*. Geological Society, London, Special Publications 418, 2015: 193-207.
- [7] 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.
- [8] 刘树根,宋金民,罗平,等. 四川盆地深层微生物碳酸盐岩储层特征及其油气勘探前景[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(2): 129-152.
- [9] 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.
- [10] 费宝生,汪建红. 中国海相油气田勘探实例之三:渤海湾盆地任丘古潜山大油田的发现与勘探[J]. *海相油气地质*, 2005, 10(3): 43-50.
- [11] 邹才能,杜金虎,徐春春,等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 278-293.
- [12] 胡广,刘文汇,腾格尔,等. 塔里木盆地寒武统泥质烃源岩成烃生物组合的构造-沉积环境控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 685-695.
- [13] 陈强路,储呈林,胡广,等. 塔里木盆地柯坪地区寒武系玉尔吐斯组沉积环境分析[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(3): 311-317, 326.
- [14] WU Lin, GUAN Shuwei, REN Rong, et al. Sedimentary evolution of Neoproterozoic rift basin in northern Tarim [J]. *Petroleum research*, 2017, 2(4): 315-323.
- [15] 朱光有,曹颖辉,闫磊,等. 塔里木盆地8000 m以深超深层海相油气勘探潜力与方向[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(6): 755-772.
- [16] 何金有,贾承造,邬光辉,等. 新疆阿克苏地区震旦系风化壳古岩溶特征及其发育模式[J]. *岩石学报*, 2010, 26(8): 2513-2518.
- [17] 钱一雄,杜永明,陈代钊,等. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面奇格布拉克组层序界面与沉积相研究[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(1): 1-8.
- [18] 严威,杨果,易艳,等. 塔里木盆地柯坪地区上震旦统白云岩储层特征与成因[J]. *石油学报*, 2019, 40(3): 295-307, 321.
- [19] 石开波,刘波,田景春,等. 塔里木盆地震旦纪沉积特征及岩相古地理[J]. *石油学报*, 2016, 37(11): 1343-1360.
- [20] 李朋威,罗平,宋金民,等. 微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素:以塔里木盆地西北缘上震旦统—下寒武统为例[J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1074-1089.
- [21] 朱晏德. 塔里木盆地西北缘震旦纪叠层石特征及其沉积环境意义[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2017.
- [22] 吴永良. 塔里木盆地震旦系沉积体系及岩相古地理特征研究[D]. 成都:成都理工大学, 2010.
- [23] 石书缘,刘伟,黄擎宇,等. 塔里木盆地北部震旦系奇格布拉克组白云岩储层特征及成因[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(8): 1226-1234.
- [24] 杨飞,鲍志东,潘文庆,等. 塔里木盆地柯坪上震旦统奇格布拉克组优质储层形成机理[J]. *石油科学通报*, 2017, 2(1): 12-23.
- [25] 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, 20(3): 177-183.
- [26] 李德伦,张大权. 塔里木盆地北部坳陷震旦纪—奥陶纪大陆裂谷性质及其演化[J]. *长春科技大学学报*, 2001, 31(2): 136-141.
- [27] XU Bei, ZOU Haibo, CHEN Yan, et al. The Sugetbrak basalts from northwestern Tarim Block of northwest China: geochronology, geochemistry and implications for Rodinia breakup and ice age in the Late Neoproterozoic [J]. *Precambrian research*, 2013, 236(5): 214-226.
- [28] 杨云坤,石开波,刘波,等. 塔里木盆地西北缘震旦纪构造-沉积演化特征[J]. *地质科学*, 2014, 49(1): 19-29.
- [29] 郑剑锋. 古老碳酸盐岩沉积环境与构造-岩相古地理研究[R]. 杭州:中国石油杭州地质研究院, 2019.
- [30] 王宇,何金有,卫巍,等. 新疆阿克苏地区新元古代晚期地层沉积相及层序地层研究[J]. *岩石学报*, 2010, 26(8): 2519-2528.
- [31] RIDING R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms [J]. *Sedimentology*, 2000, 47(s1): 179-214.
- [32] 梅冥相. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订:对灰岩成因结构分类体系的补充[J]. *地学前缘*, 2007, 14(5): 222-234.
- [33] SHAPIRO R S. A comment on the systematic confusion of thrombolites [J]. *Palaios*, 2000, 15(2): 166-169.
- [34] 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, 39(5): 616-629.
- [35] 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(4): 1163-1178.
- [36] 李朋威,罗平,陈敏,等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 416-428.
- [37] 黄擎宇,胡素云,潘文庆,等. 台内微生物丘沉积特征及其对储层发育的控制:以塔里木盆地柯坪—巴楚地区下寒武统肖尔布拉克组为例[J]. *天然气工业*, 2016, 36(6): 21-29.
- [38] 翟秀芬,汪泽成,罗平,等. 四川盆地高石梯东部地区震旦系灯影组微生物白云岩储层特征及成因[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(8): 1199-1210.
- [39] 高孝巧. 塔里木盆地巴楚—塔中地区肖尔布拉克组沉积特

- 征及控储机理[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
- [40] 李朋威,罗平,宋金民,等.塔里木盆地西北缘震旦统白云岩储层特征[J]. 海相油气地质,2015,20(4):1-12.
- [41] 王珊,曹颖辉,杜德道,等.塔里木盆地柯坪—巴楚地区肖尔布拉克组储层特征与主控因素[J]. 天然气地球科学,2018,29(6):784-795.
- [42] 王士峰,向芳.资阳地区震旦系灯影组白云岩成因研究[J]. 岩相古地理,1999,19(3):21-29.
- [43] 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),2014,41(3):339-346.
- [44] 谭秀成.四川盆地和塔里木盆地震旦系微生物白云岩储层研究[R]. 成都:西南石油大学,2018.
- [45] 胡安平,沈安江,杨翰轩,等.碳酸盐岩-膏盐岩共生体系白云岩成因及储盖组合[J]. 石油勘探与开发,2019,46(5):916-928.
- [46] MANCINI E A, LLIANS J C, PARCELL W C, et al. Upper Jurassic thrombolite reservoir play, northeastern Gulf of Mexico [J]. AAPG bulletin, 2004, 88(11): 1573-1602.
- [47] 李凌,谭秀成,曾伟,等.四川盆地震旦系灯影组灰泥丘发育特征及储集意义[J]. 石油勘探与开发,2013,40(6):666-673.
- [48] 熊鹰,姚泾利,李凌,等.鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马五<sub>1,2</sub>微生物碳酸盐岩沉积特征及储集意义[J]. 沉积学报,2016,34(5):963-972.
- [49] 何金有,邬光辉,李启明,等.塔里木盆地震旦系石油地质特征及勘探方向[J]. 新疆石油地质,2010,31(5):482-484.

编辑:董庸

## Sedimentary characteristics and reservoir significance of the microbial dolomite of Sinian Qigebrak Formation in the northwest margin of Tarim Basin

YANG Hanxuan, SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, HU Anping

**Abstract:** Microbial carbonate is a new field and hot spot for petroleum exploration. The Sinian Qigebrak Formation of Tarim Basin develop a set of thick microbial dolomite, and its type, distribution rule, and reservoir genesis are still unclear. Based on the outcrop measurement and thin section observation, the sedimentary and reservoir characteristics of the microbial dolomite in Sinian Qigebrak Formation in the northwest margin of Tarim Basin were studied. Various types and scales of microbial dolomites, including stromatolite dolomite, thrombolite dolomite, spongiostromata dolomite, and microbe-related granular dolomite were found in microbial flat and microbial mound of Qigebrak Formation. There are two third-order sequences in Qigebrak Formation, in which microbial mounds develop during the TST and the early stage of HST, while microbial flats mainly develop during the mid-late stage of HST. Stromatolite dolomite is enriched in SQ<sub>1</sub>, and spongiostromata dolomite is enriched in SQ<sub>2</sub> due to the change of environment. The microbial dolomite reservoir in the Qigebrak Formation is controlled by facies, and the mound and microbial dolomite flat on the top of the upward shallowing cycle are favorable facies zones for reservoir development. Spongiostromata dolomite could be a large-scale high-quality reservoir, which contains various types of pore space, overlays frequently in vertical and distributes stably in horizon.

**Key words:** microbial dolomites; microbial dolomite flat; Qigebrak Formation; Sinian; Tarim Basin

**YANG Hanxuan,** First author: Master candidate of PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, major in carbonate sedimentology and reservoir. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China