

# 塔里木盆地寒武统微生物礁储集性及油气勘探意义

王凯<sup>1</sup> 关平<sup>1</sup> 邓世彪<sup>1</sup> 刘沛显<sup>1</sup> 金亦秋<sup>2</sup>

(1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 北京大学地球与空间科学学院 北京 100871;

2. 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院 北京 100083)

**摘要** 通过塔北西部—柯坪地区大量的野外露头观测及室内薄片观察与物性分析,对塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组上二亚段微生物礁白云岩储集性进行了精细研究。该层微生物礁仅在研究区南部三个剖面有发现,其中在昆盖阔坦剖面发育数量最多、体积最大,呈近东西向带状、串珠状分布;英尔苏和苏盖特布拉克两剖面发育数量和体积皆较小,呈现由南到北递减趋势。微生物礁白云岩具有粒内孔、晶间孔、溶孔、格架孔、微裂缝和缝合线6种储集空间,但储集性能远低于预期目标,平均孔隙度与渗透率分别仅有1.84%和 $0.91 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属于特低孔特低渗储集体。结合前人工作不难发现,塔里木盆地寒武统甚至更老地层的微生物礁不应再作为台缘带油气勘探的重点对象,而台缘微生物颗粒滩更具有勘探潜力。

**关键词** 微生物礁 储集性 塔里木盆地 下寒武统 油气勘探

**第一作者简介** 王凯 男 1989年出生 硕士研究生 矿物学、岩石学、矿床学 E-mail: wk2013@pku.edu.cn

**通信作者** 关平 男 教授 E-mail: pguanl@pku.edu.cn

**中图分类号** TE122.2 **文献标志码** A

## 0 引言

微生物以无所不在、数量巨大以及丰富多样的新陈代谢过程在地球表层系统中起到重要作用<sup>[1-7]</sup>。特别是,中新元古界到奥陶系广泛发育的微生物碳酸盐岩,是微生物岩最重要的富集层位,越来越受地质学家的关注,有关微生物岩的研究也越来越多<sup>[8-30]</sup>。随着研究与勘探的深入,世界上不断有微生物礁作为储层的油气田被发现,塔里木盆地寒武统微生物礁也成为了研究的重点<sup>[31-34]</sup>。罗平等<sup>[23]</sup>和宋金民等<sup>[24-26]</sup>对该层位微生物岩进行了较为详细的研究,特别是以苏盖特布拉克剖面为主体对研究区微生物碳酸盐岩岩石结构特征和储集性特征进行了论述。但笔者通过对研究区详细的野外精细测量发现,塔北西部—柯坪地区微生物礁在昆盖阔坦剖面发育数量最多、体积最大,其他剖面发育规模较小或不发育。因此,本文以昆盖阔坦剖面的微生物礁为主要研究对象,利用详细的野外测量、采样和室内薄片观察以及物性分析,对研究区微生物礁的宏观分布、岩石结构与储集性及油气勘探意义做进一步厘清和研究。

## 1 区域地质背景

研究区位于塔里木盆地西北部乌什县境内,属于柯坪断隆构造分区,北东距阿克苏市区约100 km。研究区地层出露良好,中下寒武统尤为发育,是早古生代微生物礁白云岩研究的天然实验室。本次研究选取了七个典型剖面,从南向北依次为昆盖阔坦剖面、英尔苏剖面、苏盖特布拉克剖面、喀克巴什剖面、金磷矿剖面、库鲁南剖面 and 奥依皮克剖面(图1)。

研究区下寒武统地层出露完整,从下到上依次为玉尔吐斯组、肖尔布拉克组和吾松格尔组,底部与奇格布拉克组平行不整合接触,顶部与沙依里克组整合接触(表1)。

塔里木盆地早寒武世早期发生大规模海侵,随后则发生持续性海退。研究区早寒武世早期属于深水台地相,中晚期则演变为浅水碳酸盐台地相<sup>[35-36]</sup>。塔里木盆地早寒武世是具有缓坡—(斜坡坡度较小的)弱镶边的台地<sup>[37-39]</sup>,在其南部地形较高的昆盖阔坦、英尔苏和苏盖特布拉克三剖面发育微生物礁。微生物礁主要集中在肖尔布拉克组上二亚段下部,并以

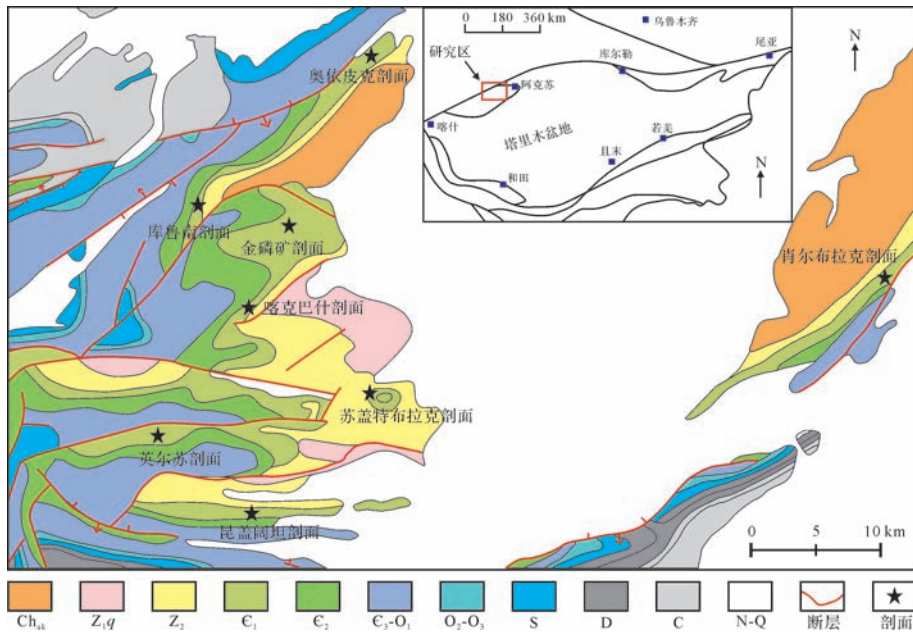


图 1 研究区地质图及剖面位置(据参考文献[40]修改)

Fig.1 Geologic map and location sections in the study area

表 1 研究区下寒武统地层框架

Table 1 Stratigraphic framework of Lower Cambrian in the study area

系	统	组	岩性特征	厚度/m
寒武系	中统	沙依里克组	下部主要为深灰色厚层燧石灰岩,上部主要为浅灰色薄层含燧石团块及条带状白云质灰岩。	99
		下统 吾松格尔组	主要为泥质云岩、含膏泥质云岩、膏质云岩和云质膏岩。	66~136
	肖尔布拉克组		下段为灰黑色泥粉晶白云岩,上一亚段为灰白色菌席白云岩,上二亚段下部发育微生物礁白云岩、中上部为灰白色球粒白云岩,上三段为灰白色颗粒滩、菌席白云岩。	110~168
		玉尔吐斯组	底部为硅质岩和黑色页岩,下部为黄白色粉—细晶白云岩,中部为黑色页岩和泥晶灰岩互层,上一顶部为浅灰色泥粉晶白云岩。	15~32
震旦系	上统	奇格布拉克组	细晶白云岩、泥质白云岩和岩溶角砾岩等。	141~186

注:据参考文献[41-44]。

昆盖阔坦剖面最为典型(图 2)。根据笔者以及前人研究,潮下高、低能交替环境沉积形成了肖尔布拉克组,而微生物礁则形成于潮下高能带<sup>[24]</sup>。

## 2 微生物礁特征

目前,学者们常根据不同的观察尺度将微生物碳酸盐岩按微观结构(microfabrics)、宏观构造(macrostructures)和巨观构造(megastructures)进行分类<sup>[3,23,46]</sup>。因此,下面从宏观展布、岩石手标本和显微镜下特征对研究区微生物礁进行详细论述。

### 2.1 微生物礁宏观展布特征

根据详细的野外露头观察,下寒武统微生物礁只发育在研究区南部的昆盖阔坦、苏盖特布拉克和英尔

苏三个剖面,其中以昆盖阔坦剖面礁体发育数量最多、体积最大,厚度可达 30 m(图 2);英尔苏剖面次之,厚度在 20 m 左右;苏盖特布拉克剖面发育最薄,厚度不足 10 m。微生物礁整体呈由南向北厚度逐渐减薄、规模逐渐减小的趋势,并且在苏盖特布拉克剖面以北不再见礁体出露。

在昆盖阔坦剖面露头区,微生物礁出现在肖尔布拉克组的第 16 分层,全区约 10 km 内的礁体成群分布。在前后距离 2~3 km 范围内连续观察到 8 个微生物礁体群,礁体群在东西向上呈带状、串珠状分布。礁体群厚度可达 30 m,南北向展布达 100 m;单个微生物礁体厚度最大可达 25 m,南北展布长达 35 m(图 3a,b)。

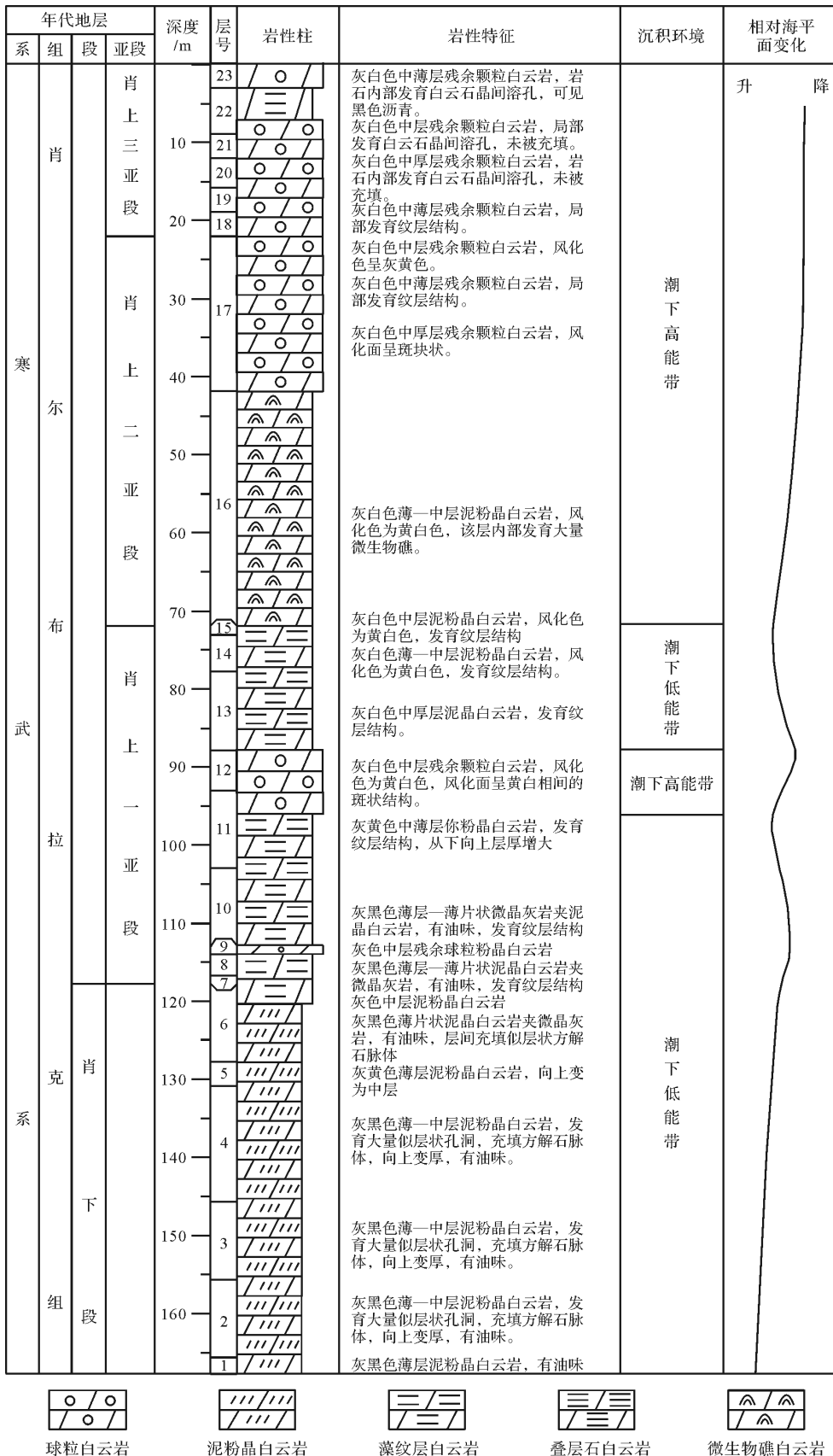


图 2 昆盖阔坦剖面下寒武统综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of Lower Cambrian in Kungaiquotan Section



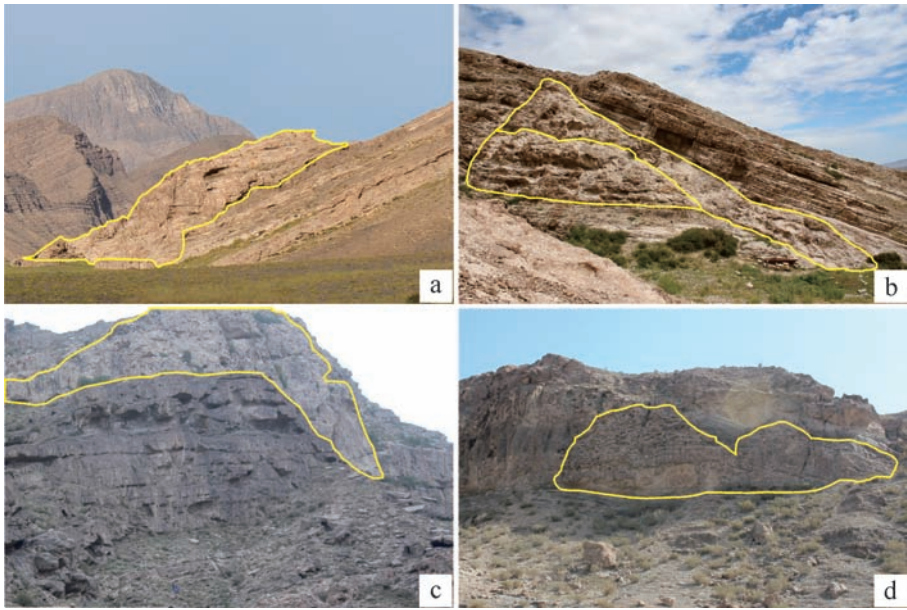


图3 研究区下寒武统微生物礁宏观特征

a.微生物礁宏观特征,礁体右上角与地层楔状接触,昆盖阔坦剖面1号礁体,羊圈高2.5 m;b.微生物礁宏观特征,礁体明显分两期,第二期礁体向南进积,昆盖阔坦剖面2号礁体;c.微生物礁宏观特征,横切面呈鞍状,英尔苏剖面;d.微生物礁宏观特征,两礁体相连呈连续的丘状,苏盖特布拉克剖面。

Fig.3 Macroscopic characteristics of Lower-Cambrian microbial reefs in the study area

在英尔苏剖面露头区,微生物礁出现在肖尔布拉克组的第10分层,呈小型丘状和鞍状(图3c)。在苏盖特布拉克剖面区,微生物礁仅出现在肖尔布拉克组的第12~13层,产出规模较小,常夹在地层中(图3d)。

## 2.2 微生物礁岩石学特征

通过岩石野外样品和显微镜下观察,研究区微生物礁主要发育凝块石结构、似球粒结构、包壳结构、纹层构造和缝合线构造5种结构及构造特征(图4)。

凝块石结构(图4b)是研究区常见的微生物结构,凝块石内部颜色较深,为泥晶白云岩,凝块石间为细—粉晶白云岩。

似球粒结构(图4c)是与微生物作用有关的球粒结构,是研究区最为常见的微生物结构。似球粒形成在水动力较弱的环境中,与微生物自身的钙化作用和凝集作用有关<sup>[3,23,26,46]</sup>。

包壳结构(图4d)也是研究区微生物结构之一,常围绕在一个或多个砂屑、凝块石外,与微生物的黏结作用和钙化作用有关<sup>[47-48]</sup>。

纹层构造是研究区常见微生物构造之一,形成亮暗相间结构(图4e)。暗层为泥晶白云岩,成因上与微生物膜或微生物席的黏结或捕获作用有关<sup>[46-47]</sup>;亮层为细—粉晶白云岩,易发育格架孔,成为油气储

集的空间。

缝合线构造在研究区也很常见(图4f),微生物作用的强弱或有无易造成沉积物在垂直剖面上的成分差异,随埋藏深度或应力的增大可以形成缝合线构造。普遍存在的缝合线构造与微生物作用的周期性、间歇性及较强的地质应力作用或埋藏作用有关,值得进一步研究。

## 3 微生物礁储层特征

根据详细的野外露头观察和测量,厘清研究区微生物礁在昆盖阔坦剖面发育规模最大、保存最完整。在昆盖阔坦剖面中2号微生物礁保存完好,与地层接触关系清晰,是作为礁滩储层建模的不错选择。因此,本次研究以2号微生物礁(图5)为研究对象,通过近网格状的野外采样与较全面的室内分析,精细描述了研究区微生物礁的储层特征。

### 3.1 微生物礁储集空间类型

通过对微生物礁系统采样及镜下薄片观察,研究区微生物礁主要发育粒内孔、晶间孔、溶孔、格架孔、微裂缝和缝合线6种储集空间类型(图6)。

粒内孔(图6a)是研究区微生物礁体中常见储集空间类型之一,与微生物颗粒(似球粒)成岩后期的溶蚀作用有关。由于往往受沉积环境和后期改造的

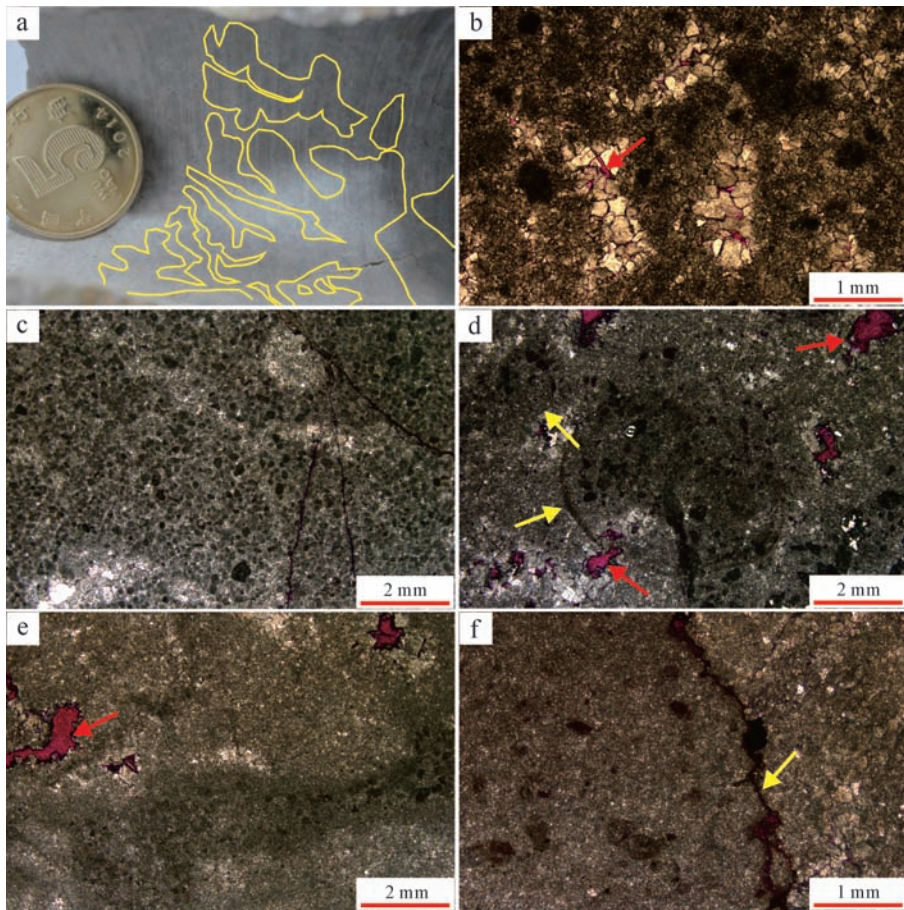


图4 研究区下寒武统微生物礁岩石学特征

a. 微生物凝块结构, 凝块间为亮晶白云石胶结, 昆盖阔坦剖面, 2H1-07; b. 微生物凝块结构, 凝块间为亮晶白云石胶结, 昆盖阔坦剖面, 2W1-11; c. 似球粒结构, 亮晶白云石胶结, 昆盖阔坦剖面, JT4-5; d. 包壳结构(黄色箭头), 包壳包裹在凝块石外, 昆盖阔坦剖面, JT4-2; e. 纹层构造, 暗层为与微生物作用有关的高有机质纹层, 亮层为粉晶白云岩, 昆盖阔坦剖面, JT1-2; f. 缝合线构造(黄色箭头), 左边为与微生物作用有关的泥晶白云岩, 右边为细晶白云岩, 昆盖阔坦剖面, KJT2-17。

Fig.4 Petrologic characteristics of Lower Cambrian microbial reefs in the study area



图5 昆盖阔坦剖面2号微生物礁采样点及期次示意图

Fig.5 Sampling points and schematic diagram of the 2<sup>nd</sup> microbial reefs, Kungaiquotan Section



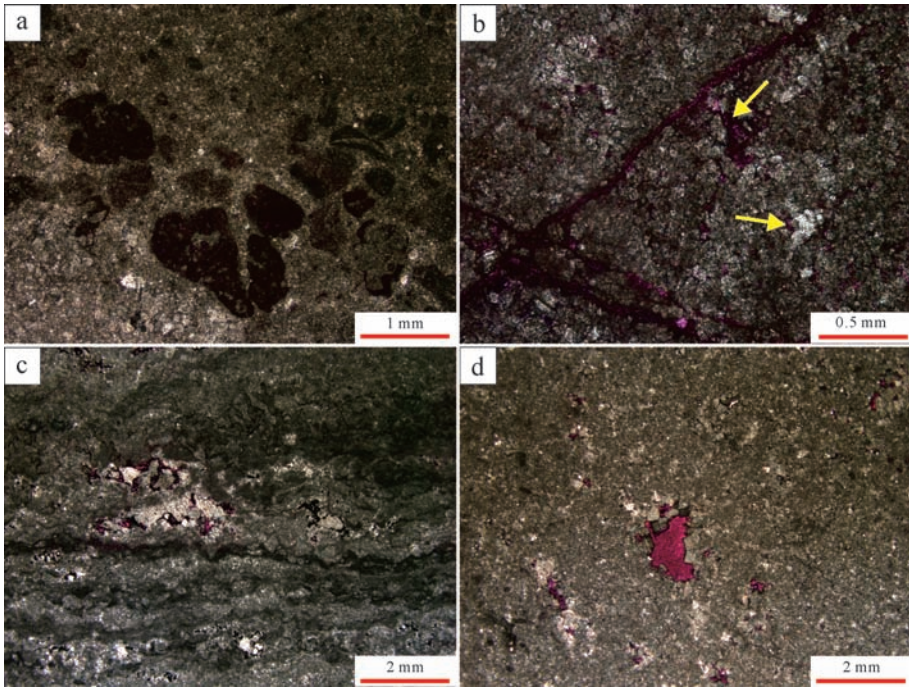


图6 昆盖阔坦2号微生物礁储集空间类型

a.粒内孔,昆盖阔坦剖面2号礁体,KJT2-38铸体;b.微裂缝、晶间孔(黄色箭头),昆盖阔坦剖面2号礁体,KJT2-3铸体;c.格架孔,亮暗相间结构,昆盖阔坦剖面2号礁体,KJT2-25铸体;d.溶孔,昆盖阔坦剖面2号礁体,KJT2-35铸体。

Fig.6 Types of reservoir space of the 2<sup>nd</sup> microbial reefs, Kungaikuotan Section

共同控制,形成孔隙相对孤立、连通性较差的储层空间。

晶间孔(图4b红色箭头;图6b黄色箭头)属于白云石化作用后残余孔隙及少量后期溶蚀孔隙。在整个微生物礁体中发育程度不高,成岩后期溶蚀作用不强,作为油气储集空间的贡献率不高。

溶孔(图4d、e红色箭头;图6d)是微生物礁成岩作用后期遭受溶蚀作用形成。这是研究区最重要的储集类型,但只在局部发育,普遍发育程度不高,可能与局部流体作用较强有关。

格架孔(图6c)的形成与微生物周期性活动有关,形成亮暗相间结构。亮层主要与微生物矿化作用和胶结作用有关,发育格架孔;暗层则以微生物的黏结和捕获作用为主,不发育孔隙<sup>[45,47]</sup>。

微裂缝(图6b)在研究区微生物礁体中较常见,可能与后期构造活动或采样中人为因素有关。增加了油气储集空间的连通性,有助于各类孔隙进一步发育。

缝合线(图4f)是研究区微生物礁体发育的重要储集空间,与沉积环境、埋藏深度及后期构造应力作用等有关。

### 3.2 微生物礁孔隙度及渗透率

对研究区微生物礁观察点和昆盖阔坦2号微生物礁建模点(图5)详细的薄片观察后,进一步对微生物礁白云岩进行物性分析,精确掌握研究区微生物礁白云岩的孔隙度和渗透率情况(表2)。

根据白云岩储层评价标准,可将微生物礁白云岩按孔隙度 $<1.8\%$ 、 $1.8\% \sim 4.5\%$ 和 $>4.5\%$ 分为Ⅲ类、Ⅱ类和Ⅰ类。研究发现微生物礁建模点白云岩以Ⅲ、Ⅱ类储层为主(图7a),Ⅲ、Ⅱ类储层平均孔隙度分别为 $1.32\%$ 和 $3.08\%$ ,皆属于特低孔储层;Ⅰ类储层仅在局部发育,平均孔隙度达 $6.34\%$ ,属于低孔储层。建模点样品中渗透率 $<1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 有35个,属于特低渗储层;渗透率位于 $1 \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间的样品有3个,属于低渗储层; $>10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品只有1个,为中渗储层(图7b)。而礁体观察点同样是以Ⅲ、Ⅱ类储层为主(图7c),孔隙度分别为 $1.20\%$ 和 $2.17\%$ ,具有与礁体建模点一致的特征,同时也证明了建模点选取的正确性和有效性;平均渗透率也仅有 $0.638 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,仍以特低渗储层为主(图7d),渗透率 $>1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 样品比率不足 $1\%$ 。

总之,虽然微生物礁发育粒内孔、晶间孔、溶孔、

表2 研究区微生物礁白云岩物性参数表

Table 2 The porosity and permeability of microbial-reef dolostones in the study area

编号	岩石视密度/(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙度/%	平行渗透率/10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>
1	2.82	1.42	1.36E-02
2	2.81	1.24	5.58E-02
3	2.78	2.71	—
4	2.8	1.76	—
5	2.81	1.78	2.60E-01
6	2.76	3.47	5.50E-02
7	2.84	0.52	3.85E-02
8	2.82	1.2	4.61E-01
9	2.79	2.24	2.68E-01
10	2.8	1.8	4.64E+00
11	2.75	3.3	4.99E-01
12	2.72	4.62	1.14E-01
13	2.82	1.27	9.76E+00
14	2.82	1.04	2.26E-01
15	2.81	1.66	3.34E-02
16	2.67	6.19	1.36E+01
17	2.79	1.97	7.57E-01
18	2.82	1.39	3.56E-02
19	2.82	1.47	2.77E-01
20	2.83	0.75	6.18E-02
21	2.8	1.72	2.84E-01
22	2.79	1.69	6.71E+00
23	2.82	1.04	3.55E-02
24	2.82	1.36	2.04E-02
25	2.79	1.96	4.57E-01
26	2.82	1.25	2.55E-02
27	2.83	0.94	4.67E-02
28	2.81	1.64	4.69E-02
29	2.82	1.42	2.23E-02
30	2.81	1.47	6.52E-02
31	2.81	1.55	3.76E-02
32	2.73	4.56	4.18E-02
33	2.79	2.36	4.85E-02
34	2.82	1.73	2.83E-02
35	2.81	1.74	1.77E-01
36	2.82	1.48	5.79E-02
37	2.85	0.63	5.82E-02
38	2.81	1.62	2.83E-02
39	2.81	1.67	—
40	2.83	1.25	4.31E-02
41	2.84	0.63	1.93E-02
42	2.84	0.74	2.88E-02
43	2.83	0.86	—
44	2.66	6.48	—
45	2.75	3.59	—
46	2.83	0.99	—
47	2.83	0.93	—
48	2.78	2.18	—
49	2.81	1.41	—
50	2.82	1.28	—
51	2.79	2.1	—
52	2.81	1.58	—
53	2.83	1.04	5.54E-02
54	2.82	1.31	4.01E-02
55	2.83	1.05	1.72E-01
56	2.8	1.92	4.89E+00
57	2.83	0.92	6.71E-02
58	2.8	2.15	8.03E-02
59	2.82	1.2	1.54E-01
60	2.82	1.5	3.52E-01
61	2.79	2.58	4.55E-02
62	2.81	1.64	7.04E-02
63	2.84	0.69	2.73E-02
64	2.8	2.22	3.40E-02
65	2.8	2.04	1.31E-01
66	2.73	4.56	6.26E-01
67	2.83	0.99	2.83E+00

注：“—”代表参数缺失；编号1~46为微生物礁建模点样品，编号47~67为微生物礁观察点样品。

格架孔、微裂缝和缝合线6种储集空间类型。但平均孔隙度为1.84%，平均渗透率仅有 $0.91 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属于特低孔特低渗白云岩储层。I类储层样品普遍具有溶孔较发育的特点，但在微生物礁中只见局部发育；而III类储层则以致密的微生物结构为主要特征，在微生物礁中却普遍存在。这可能与微生物作用类型和强弱以及后期流体溶蚀有关，微生物岩的原生结构和构造直接影响后期流体溶蚀作用强弱，对储层发育的有效性起着关键作用<sup>[23]</sup>。因此，研究区微生物礁储集空间普遍发育程度不高、连通性较差，仅局部发育较好，多为致密型微生物礁(图4c)，很难成为下寒武统油气储集的主要场所。

## 4 勘探意义

国内不少专家学者根据生物礁、滩储层发育特征及空间展布规律，为海相油气盆地资源勘探提供了新思路，并取得了重大发现和突破，为我国油气勘探做出巨大贡献<sup>[49-56]</sup>。同时，成功勘探经验也为塔里木盆地深层油气勘探指明了方向。

塔北西部—柯坪地区下寒武统属于塔里木盆地台缘带，台缘带微生物礁与滩当然成为了该层位最重要的勘探对象。根据上述研究认识并结合前人<sup>[23-26,57-60]</sup>的研究成果不难发现，与以往礁、滩皆为良好油气储层的经验不同，下寒武统微生物礁白云岩储集性较差，属于特低孔特低渗储层，不可能再是未来油气勘探的主要对象。因此，塔里木盆地下寒武统油气勘探的重点不应该再是肖尔布拉克组上二亚段微生物礁，更可能是肖尔布拉克组上二、三亚段的微生物台缘颗粒滩。

造成微生物礁、滩储集性显著差异的原因可能与微生物的种类有关。早寒武世造礁微生物包括细菌、真菌、微体藻类及原生动物，这些微生物主要通过自身有关的矿化作用和黏结、捕获沉积物来建造微生物岩<sup>[3,5,7,23,38,46-47]</sup>。这类微生物由于缺乏类似珊瑚、海绵等骨架生物，既难以形成大型生物礁，又由于缺乏各类原始孔隙，而不利于后期流体改造，自然很难形成规模的油气储集空间。因此，在塔里木盆地寒武系地层中，微生物礁不应再作为台缘带油气勘探的重点，而瞄准与微生物作用相关的颗粒滩更具有勘探潜力。这对塔里木盆地更古老地层油气勘探也具有重要的启发意义。

## 5 结论

(1) 塔北西部—柯坪地区下寒武统微生物礁只

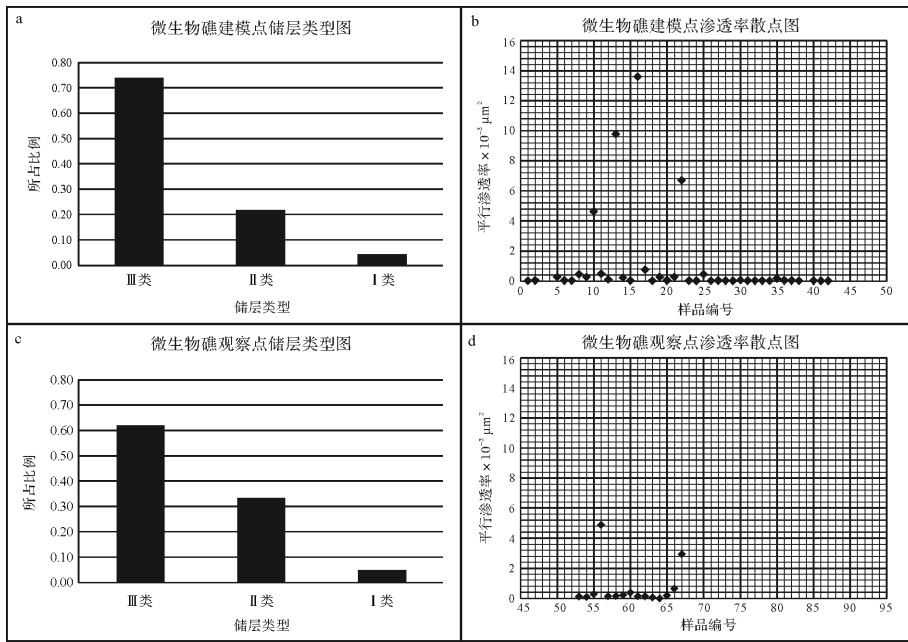


图 7 研究区微生物礁储层类型及渗透率散点图

Fig.7 Types of reservoirs of microbial reefs and scatter diagram of permeability in the study area

出现在研究区南部,其中昆盖阔坦剖面发育数量最多、体积最大,礁体群在近东西向上呈带状、串珠状分布;在英尔苏和苏盖特布拉克剖面发育规模较小,整体呈现由南向北递减的趋势。

(2) 研究区微生物礁发育凝块石结构、似球粒结构、包壳结构、纹层构造和缝合线构造 5 种结构及构造,具有粒内孔、晶间孔、溶孔、格架孔、微裂缝和缝合线 6 种储集空间类型,但储集性远低于预期目标,平均孔隙度和渗透率仅有 1.84% 和  $0.91 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属于特低孔特低渗储层。

(3) 研究区微生物礁储集性偏差,在塔里木盆地寒武统地层中,该类微生物礁不应再作为台缘带油气勘探的重点对象,而台缘微生物颗粒滩更具有勘探潜力。

参考文献 (References)

- 1 Nokffe N, Gerdes G, Klenke T, et al. Microbially induced sedimentary structures: A new category within the classification of primary sedimentary structures[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(5): 649-656.
- 2 Riding R. Microbial carbonates: The geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms[J]. Sedimentology, 2000, 47(S 1): 179-214.
- 3 Riding R. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: Concepts and categories[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 58(1/2): 163-231.

- 4 Riding R. Microbial carbonate abundance compared with fluctuations in metazoan diversity over geological time [J]. Sedimentary Geology, 2006, 185(3/4): 229-238.
- 5 Warren L A, Kuuffman M E. Microbial geoengineers [J]. Science, 2003, 299(5609): 1027-1029.
- 6 Fox W T. Reefs, non-coral[C]//Schwartz M L. Encyclopedia of Coastal Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005: 795.
- 7 Schieber J, Bose P K, Eriksson P G, et al. Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Siliclastic Rock Record[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- 8 Twenhofel W H. Coral and other organic reefs in geologic column[J]. AAPG Bulletin, 1950, 34(2): 182-202.
- 9 Burne R V, Moore L S. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities[J]. Palaios, 1987, 2(3): 241-254.
- 10 Wood R. Are reefs and mud mounds really so different? [J]. Sedimentary Geology, 2001, 145(3/4): 161-171.
- 11 Kiessling W, Flügel E. Paleoreefs-A database on Phanerozoic reefs [J]. Phanerozoic Reef Patterns, 2002, 72: 77-92.
- 12 戴永定,陈孟毅,王尧. 微生物岩研究的发展与展望[J]. 地球科学进展, 1996, 11(2): 209-215. [Dai Yongding, Chen Meng'e, Wang Yao. Development and perspective of research for microbialites [J]. Advance in Earth Sciences, 1996, 11(2): 209-215.]
- 13 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.]
- 14 梅冥相,孟庆芬,刘智荣. 微生物形成的原生沉积构造研究进展综述[J]. 古地理学报, 2007, 9(4): 353-367. [Mei Mingxiang, Meng



- Qingfen, Liu Zhirong. Overview of advances in studies of primary sedimentary structures formed by microbes[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(4): 353-367.]
- 15 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 Mingxiang. Discussion on advances of microbial carbonates from the terminological change of thrombolites[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(6): 1-9.]
  - 16 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. [Mei Mingxiang. Revised classification of microbial carbonates: complementing the classification of limestones[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 222-234.]
  - 17 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 Palaeogeography*, 2014, 16(3): 285-304.]
  - 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): 29-38. [Han Zuozhen, Chen Jitao, Chi Naijie, et al. Microbial carbonates: a review and perspectives[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 29-38.]
  - 19 陈金勇,韩作振,范洪海,等. 鲁西寒武系第三统张夏组凝块石特征及其形成环境研究[J]. *沉积学报*, 2014, 32(3): 494-502. [Chen Jinyong, Han Zuozhen, Fan Honghai, et al. Characteristics and sedimentary environment of thrombolite in the Zhangxia Formation (third series of Cambrian), Shandong province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(3): 494-502.]
  - 20 陈金勇,韩作振,范洪海,等. 鲁西寒武系凝块石特征及其形成机制的探讨[J]. *地质学报*, 2014, 88(6): 967-979. [Chen Jinyong, Han Zuozhen, Fan Honghai, et al. Characteristics and formation mechanism of Cambrian thrombolite in western Shandong province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(6): 967-979.]
  - 21 王月,沈建伟,杨红强,等. 微生物碳酸盐沉积及其研究意义[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(10): 1038-1049. [Wang Yue, Shen Jianwei, Yang Hongqiang, et al. Microbial carbonates and its research significance[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(10): 1038-1049.]
  - 22 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. [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.]
  - 23 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 perspectives of microbial carbonate reservoirs[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 807-823.]
  - 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]. *Xingjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(6): 668-671.]
  - 25 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 Xiaorbak Formation in Sugaitblak area, Tarim Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(3): 341-354.]
  - 26 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): 404-413, 437. [Song Jinmin, Luo Ping, Yang Shisheng, et al. Reservoirs of the Lower Cambrian microbial carbonates, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(4): 404-413, 437.]
  - 27 邵龙义,韩俊,马锋,等. 塔里木盆地东部寒武系白云岩储层及相控特征[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 953-961. [Shao Longyi, Han Jun, Ma Feng, et al. Characteristics of the Cambrian dolomite reservoirs and their facies-controlling in eastern Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 953-961.]
  - 28 石敏. 华北中元古代碳酸盐岩系微生物群演替及真核生物演化[D]. 北京:中国地质大学, 2014. [Shi Min. Microbiotic replacement and eukaryote evolution in Mesoproterozoic carbonate series of North China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.]
  - 29 汤冬杰. 华北地台中元古代微生物岩:微结构、有机矿化过程及其古海洋环境研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2013. [Tang Dongjie. Mesoproterozoic microbialites from North China Platform: microfibrils, organomineralization processes and their palaeoenvironmental distribution[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.]
  - 30 段凯波,段东生,陈留勤,等. 微生物碳酸盐岩研究进展及存在的问题[J]. *西北地质*, 2008, 41(1): 44-49. [Duan Kaibo, Duan Dongsheng, Chen Liuqin, et al. Progress and problems in microbial carbonates research[J]. *Northwestern Geology*, 2008, 41(1): 44-49.]
  - 31 卫平生,刘全新,张景廉,等. 再论生物礁与大油气田的关系[J]. *石油学报*, 2006, 27(2): 38-42. [Wei Pingsheng, Liu Quanxin, Zhang Jinglian, et al. Re-discussion of relationship between reef and giant oil-gas fields[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(2): 38-42.]
  - 32 甘玉青,肖传桃,张斌. 国内外生物礁油气勘探现状与我国南海生物礁油气勘探前景[J]. *海相油气地质*, 2009, 14(1): 16-20. [Gan Yuqing, Xiao Chuantao, Zhang Bin. Situation of bioherm reservoir exploration in the world and the oil exploration prospect of bioherm reservoirs in South China Sea[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(1): 16-20.]
  - 33 马锋,杨柳明,顾家裕,等. 世界白云岩油气田勘探综述[J]. *沉积学报*, 2011, 29(5): 1010-1021. [Ma Feng, Yang Liuming, Gu Jiayu, et al. The summary on exploration of the dolomite oilfields in the world[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(5): 1010-1021.]
  - 34 张宁宁,何登发,孙衍鹏,等. 全球碳酸盐岩大油气田分布特征及其控制因素[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(6): 54-65. [Zhang Ningning, He Dengfa, Sun Yanpeng, et al. Distribution patterns and controlling factors of giant carbonate rock oil and gas fields worldwide

- [J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(6): 54-65.]
- 35 冯增昭,彭勇民,金振奎,等. 中国早寒武世岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2002, 4(1): 1-12. [Feng Zengzhao, Peng Yongmin Jin Zhenkui, et al. Lithofacies palaeogeography of the Early Cambrian in China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4(1): 1-12.]
- 36 冯增昭,鲍志东,吴茂炳,等. 塔里木地区寒武纪岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2006, 8(4): 427-439. [Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Wu Maobing, et al. Lithofacies palaeogeography of the Cambrian in Tarim area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2006, 8(4): 427-439.]
- 37 赵宗举,罗家洪,张运波,等. 塔里木盆地寒武纪层序岩相古地理[J]. *石油学报*, 2011, 32(6): 937-948. [Zhao Zongju, Luo Jiahong, Zhang Yunbo, et al. Lithofacies paleogeography of Cambrian sequences in the Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(6): 937-948.]
- 38 高志前,樊太亮,焦志峰,等. 塔里木盆地寒武—奥陶系碳酸盐岩台地样式及其沉积响应特征[J]. *沉积学报*, 2006, 24(1): 19-27. [Gao Zhiqian, Fan Tailiang, Jiao Zhifeng, et al. The structural types and depositional characteristics of carbonate platform in the Cambrian-Ordovician of Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(1): 19-27.]
- 39 高志前,樊太亮,杨伟红,等. 塔里木盆地古生界碳酸盐岩台缘结构特征及其演化[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2012, 42(3): 657-665. [Gao Zhiqian, Fan Tailiang, Yang Weihong, et al. Structure characteristics and evolution of the Eopaleozoic carbonate platform in Tarim Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012, 42(3): 657-665.]
- 40 李保华,邓世彪,陈永权,等. 塔里木盆地柯坪地区下寒武统台缘相白云岩储层建模[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(7): 1233-1244. [Li Baohua, Deng Shibiao, Chen Yongquan, et al. The reservoir modeling of platform margin dolostone of Xiaerblak Formation, Lower Cambrian, Kalpin area, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(7): 1233-1244.]
- 41 高振家,吴绍祖,李永安,等. 新疆阿克苏—柯坪地区震旦纪—寒武纪地层研究[J]. *科学通报*, 1981, 26(12): 741-743. [Gao Zhenjia, Wu Shaouzu, Li Yong'an, et al. The stratigraphic study of Sinian-Cambrian in Aksu-Kelpin area, Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1981, 26(12): 741-743.]
- 42 王务严,肖兵,章森桂,等. 新疆阿克苏—乌什地区寒武系划分与对比[J]. *新疆地质*, 1985, 3(4): 59-74, 103-105. [Wang Wuyan, Xiao Bing, Zhang Sengui, et al. Division and correlation of Cambrian System in Aksu-Wushi district of Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 1985, 3(4): 59-74, 103-105.]
- 43 吴贤涛,李永安. 新疆震旦纪痕迹化石 *Planolites*, *Chondrites* 的发现及其意义[J]. *地质科学*, 1987(3): 239-245. [Wu Xiantao, Li Yong'an. The discovery and significance of trace fossils from Sinian marine sediments in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1987(3): 239-245.]
- 44 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. [Qian Yixiong, Du Yongming, Chen Daizhao, et al. Stratigraphic sequences and sedimentary facies of Qigebulak Formation at Xianerbulak, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(1): 1-8.]
- 45 Ahr W M. Microbial carbonate facies and reservoirs[R]. Rio de Janeiro, Brazil, 2009.
- 46 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, Yoichi E, 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*, 2009, 45(2): 279-288.]
- 47 Reid R P, Visscher P T, Decho A W, et al. The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites[J]. *Nature*, 2000, 406(6799): 989-992.
- 48 鑫廷福. 天津蓟县雾迷山组微生物碳酸盐岩沉积与储层特征[D]. 成都:成都理工大学, 2014. [Xin Tingfu. Microbial carbonate rocks sedimentary and reservoir characteristics in Wumishan Jixian Tianjin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.]
- 49 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J]. *石油学报*, 2010, 31(3): 347-354. [Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Distribution and further exploration of the large-medium sized gas fields in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(3): 347-354.]
- 50 王佳,刘树根,黄文明,等. 四川盆地南部地区寒武系油气勘探前景[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(5): 74-82. [Wang Jia, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Oil and gas exploration prospects of Cambrian in southern Sichuan Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(5): 74-82.]
- 51 郭旭升,胡东风. 川东北礁滩天然气勘探新进展及关键技术[J]. *天然气工业*, 2011, 31(10): 6-11. [Guo Xusheng, Hu Dongfeng. New progress and key techniques in gas exploration of reef-bank reservoirs in the northeastern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(10): 6-11.]
- 52 邹才能,徐春春,汪泽成,等. 四川盆地台缘带礁滩大气区地质特征与形成条件[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(6): 641-651. [Zou Caineng, Xu Chunchun, Wang Zecheng, et al. Geological characteristics and forming conditions of the large platform margin reef-shoal gas province in the Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(6): 641-651.]
- 53 赵文智,沈安江,周进高,等. 礁滩储集层类型、特征、成因及勘探意义——以塔里木和四川盆地为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 257-267. [Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Zhou Jingao, et al. Types, characteristics, origin and exploration significance of reef-shoal reservoirs: A case study of Tarim Basin, NW China and Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 257-267.]
- 54 黄福喜,杨涛,闫伟鹏,等. 四川盆地龙岗与元坝地区礁滩成藏对比分析[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(3): 12-20. [Huang Fuxi, Yang Tao, Yan Weipeng, et al. Comparison and analysis of reef-bank gas reservoirs in Longgang and Yuanba areas in Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(3): 12-20.]

- 55 冉隆辉, 谢姚祥, 王兰生. 从四川盆地解读中国南方海相碳酸盐岩油气勘探[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 289-294. [Ran Longhui, Xie Yaoxiang, Wang Lansheng. Understanding exploration of marine carbonate reservoirs in South China through Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 289-294.]
- 56 赵宗举, 范国章, 吴兴宁, 等. 中国海相碳酸盐岩的储层类型、勘探领域及勘探战略[J]. 海相油气地质, 2007, 12(1): 1-11. [Zhao Zongju, Fan Guozhang, Wu Xingning, et al. Reservoir types, exploration domains and exploration strategy of marine carbonates in China [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(1): 1-11.]
- 57 金亦秋. 塔北西部早寒武世白云岩沉积储层野外建模及区域储层分析[D]. 北京: 北京大学, 2014. [Jin Yiqiu. Field modeling of sedimentary reservoirs of Early Cambrian in the west of northern Tarim Basin and regional reservoir analysis[D]. Beijing: Peking University, 2014.]
- 58 邵龙义, 何宏, 彭苏萍, 等. 塔里木盆地巴楚隆起寒武系及奥陶系白云岩类型及形成机理[J]. 古地理学报, 2002, 4(2): 19-30. [Shao Longyi, He Hong, Peng Suping, et al. Types and origin of dolostones of the Cambrian and Ordovician of Bachu uplift area in Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(2): 19-30.]
- 59 郑剑锋, 沈安江, 刘永福, 等. 塔里木盆地寒武-奥陶系白云岩成因及分布规律[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(6): 600-604. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Genesis and distribution of the Cambro-Ordovician dolomite in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(6): 600-604.]
- 60 陈永权, 周新源, 杨文静. 塔里木盆地寒武系白云岩的主要成因类型及其储层评价[J]. 海相油气地质, 2009, 14(4): 10-17. [Chen Yongquan, Zhou Xinyuan, Yang Wenjing. Genesis of Cambrian dolostone and the reservoir evaluation in Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(4): 10-17.]

## Reservoirs of the Lower Cambrian Microbial Reefs and Its Significance on Petroleum Exploration, Tarim Basin, NW China

WANG Kai<sup>1</sup> GUAN Ping<sup>1</sup> DENG ShiBiao<sup>1</sup> LIU PeiXian<sup>1</sup> JIN YiQiu<sup>2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The microbial reef reservoirs of the 2<sup>nd</sup> submember in the upper part of the Lower Cambrian Xiaerbulak Formation have been researched based on outcrop section, thin section identification and experiment analysis in the west of North Tarim to Kelpin area. The microbial reefs were found in south of the study area, of which the largest number and volume growth in Kungaiquotan section, showing a nearly E-W distribution, while less development in Yingersu and Sugaitbulak sections. 6 kinds of reservoir space developed in the microbial reef dolostones: intragranular pores, intergranular pores, dissolved pores, fenestral pores, micro-fractures and stylolites. But the reservoir characteristics are far from expectative goals, the average porosity and permeability are only 1.84% and  $0.91 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , belongs to ultra-low porosity and ultra-low permeability reservoirs. It's difficult to the effective reservoirs of Lower Cambrian in Tarim Basin. Combined with previous work, the microbial reefs should not be used as the key objects of hydrocarbon exploration in Lower Cambrian and even older strata, whereas the microbial bank can be used as the next major explorative horizon.

**Key words:** microbial reef; reservoir characteristics; Tarim Basin; Lower Cambrian; hydrocarbon exploration