

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

杨飞^{1,2}, 鲍志东^{1,2*}, 潘文庆³, 刘金侠⁴, 张德民⁵, 肖菁^{1,2}

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

3 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 库尔勒 841000

4 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京 100083

5 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

* 通信作者, baozhd@cup.edu.cn

收稿日期: 2016-08-08

国家科技重大专项“塔里木盆地白云岩优质储集层发育模式及分布规律”(2011ZX05044-004-007)资助

摘要 为了厘清塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组储层发育的主控因素和成因机制, 基于5个露头观测和2口钻井资料, 本文采用岩石学和地球化学相结合的方法, 对储层岩石类型、储集空间类型和充填物特征以及岩石稳定同位素和微量元素特征等进行了综合解析。结果显示, 奇格布拉克组储层以发育溶洞、溶蚀孔洞、晶间溶孔等为主要特征, 且储层岩石类型主要为凝块石白云岩、叠层石白云岩和颗粒白云岩。通过对储层主控因素的分析, 明确奇格布拉克组优质储层的形成是建立在微生物礁、微生物潮坪和颗粒滩等有利的沉积微相基础之上, 受准同生溶蚀、表生溶蚀、热液溶蚀、热液白云化、有机酸溶蚀和构造破裂等多种因素共同作用的结果, 其中, 表生溶蚀、热液溶蚀和有机酸溶蚀作用是储层形成最重要的3个影响因素, 且表生溶蚀对优质储层的形成起了决定性作用。

关键词 主控因素; 溶蚀作用; 形成机制; 奇格布拉克组; 塔里木盆地

0 引言

在油气勘探领域, 碳酸盐岩储层占据至关重要的地位, 超过全球油气资源储量50%、产量60%的油气来自于碳酸盐岩中^[1-2]。我国有近300万km²的碳酸盐岩分布区, 油气资源量大于300亿t油当量, 勘探潜力巨大^[3-5], 但储层埋藏深(多大于4000m), 经历的地质条件复杂^[5-6]。据此, 众多学者提出, 岩溶作用、白云化作用、构造破裂等是深埋碳酸盐岩形成优质储层的重要保障^[7-8]。塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组超深层碳酸盐岩岩溶作用发育, 其上覆盖有下寒武统

玉尔吐斯组优质烃源岩与其构成良好生储盖配置^[9-10], 虽然多口探井见有油气显示, 但勘探尚未取得重大进展, 目前对该套地层的油气勘探仍处于探索阶段。前人对奇格布拉克组碳酸盐岩的沉积特征、岩石学特征、白云岩成因和构造层序等方面做过相关研究, 认为奇格布拉克组主要为开阔台地和局限台地沉积, 以发育藻白云岩为特征, 其白云岩成因主要认为存在萨布哈白云化作用、混合水白云化作用、埋藏白云化作用, 以及微生物白云化作用等。然而, 由于受应用资料的限制, 对储层的研究相对薄弱^[11-13], 相关文献报道也较少, 现有的研究主要为储层岩石学特征、储集空间

引用格式: 杨飞, 鲍志东, 潘文庆, 刘金侠, 张德民, 肖菁. 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. 石油科学通报, 2017, 01: 12-23

YANG Fei, BAO Zhidong, PAN Wenqing, LIU Jinxia, ZHANG Demin, XIAO Jing. The formation mechanism of high quality reservoirs in the Qigebulake Formation, Upper Sinian, Tarim Basin. Petroleum Science Bulletin, 2017, 01: 12-23. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.002

特征的研究, 以及岩溶作用的识别、划分和岩溶模型的建立等, 且这些研究多为对储层现象的描述, 缺乏对成岩作用的综合研究和对储层发育特征成因机理的深入探讨, 储层发育的控制因素不清晰。据此, 本文以塔里木盆地西北缘 5 个露头以及星火 1、乔古 1 两口井的钻井资料为基础(图 1), 通过岩石学和地球化学等方法, 深入探讨了奇格布拉克组优质储层发育的主要控制因素和成因机制, 以为盆地奇格布拉克组油气勘探方向提供借鉴。

1 地质背景

塔里木盆地位于新疆维吾尔自治区, 面积为 56 万 km², 是一个大型多旋回叠合盆地, 具有完整的震旦系沉积^[14]。通过对塔里木盆地震旦系层序地层的研究^[15-17], 学者们将震旦系划分为上统和下统, 并分别划分为多个层组(表 1), 本文采用柯坪地区的地层划分标准。大约从 740 Ma 开始, 盆地开始接受新元古代地层沉积^[18-19], 然而对新元古代构造、沉积演化还存在较大的分歧。达成共识的主要是: (1) 早震旦世(635~550 Ma)为大陆裂谷盆地发育阶段, 在塔里木板块边缘和内部发育大陆裂谷盆地, 如北昆仑裂谷、满加尔裂谷、库鲁克塔格裂谷、柯坪裂谷和南天山裂谷等, 沉积了一套厚度达上千米的粗碎屑岩。(2) 晚震旦世(550~542 Ma), 从麦盖提—塔东一线及以北地区形成了一定规模的洋盆, 以南地区主要为古陆。在麦盖提以西地区主要为陆棚沉积, 盆地北部边缘从拜城—尉犁的广阔地区为开阔台地潮坪沉积, 其他地区以局限台地沉积为主^[20-24]。(3) 晚震旦世, 大气富含 CO₂、沉积水体较浅且海水温暖^[25-27], 沉积物以碳酸盐岩为主, 岩石类型以微生物白云岩为主, 其次为晶粒白云岩、颗粒白云岩和泥晶白云岩, 局部含泥质白云岩。

在震旦纪末期, 受“柯坪运动”影响^[28], 塔里木板块整体抬升遭受剥蚀, 形成了广泛分布的平行不整合和岩溶储层。受加里东、晚海西、晚燕山等时期的

构造运动影响, 在奥陶纪、早二叠世和白垩纪发生了多期地质热事件, 其中以早二叠世的地质热事件对储层影响最为显著, 从塔中到柯坪地区乃至整个盆地广泛分布的玄武岩, 主要是早二叠世火山喷发热事件的产物。本文应用的露头和钻井位置以及地层分布特征见图 1 所示。

2 储层特征

2.1 岩石学特征

基于露头、薄片等鉴定, 上震旦统奇格布拉克组岩石类型主要为凝块石白云岩、叠层石白云岩、颗粒白云岩和晶粒白云岩等(图 2)。凝块石白云岩呈现为厚层-块状, 主要发育在地层的上部和中部, 由于白云化作用彻底, 凝块石颗粒多呈现为残余结构, 且多呈现三期胶结(图 2a), 第一期主要为等厚环边胶结, 第二期为柱纤状胶结, 第三期为粒状胶结。叠层石白云岩多以薄-厚层状产出(图 2b), 主要发育于地层的中部和中部, 鸟眼构造发育(图 2c)。颗粒白云岩多与凝块石白云岩呈互层或共生, 颗粒主要为鲕粒、砂屑和砾屑(图 2d, e)。晶粒白云岩按晶粒大小可分为粗晶、中晶、细晶和微晶(图 2f-i), 晶粒白云岩原岩多为凝块石白云岩和叠层石白云岩, 镜下岩石残余结构不明显, 露头区凝块构造或叠层构造清晰可见(图 2b)。

2.2 储集空间特征

奇格布拉克组储层常见的储集空间有溶洞(≥10 cm)、溶蚀孔洞(<10 cm)、晶间溶孔、晶间孔、粒内溶孔、铸模孔、粒间孔和裂缝等(图 3), 其中, 前三者为最主要的储集空间类型。溶洞主要发育在凝块石白云岩和叠层石白云岩中, 呈拉长状顺层分布, 多为垮塌角砾、暗河泥岩、热液硅质半-全充填(图 3a, b), 可伴生有黄绿色黄玉、放射状阳起石、黑色放射状电气石、紫红色石榴石、自形石英、黄铁矿、

表 1 塔里木盆地震旦系地层分区表(据贾承造等^[14], 2004)

Table 1 The stratigraphic classification of the Sinian in the Tarim Basin (from Jia Chengzao et al, 2004)

地层系统/地层分区	库鲁克塔格	柯坪	塔克拉玛干	铁克里克
震旦系	上统	汉格尔乔克组 水泉组	奇格布拉克组	奇格布拉克组 克孜苏胡木组
	下统	育肯沟组 扎摩克提组	苏盖特布拉克组	苏盖特布拉克组 雨塘组

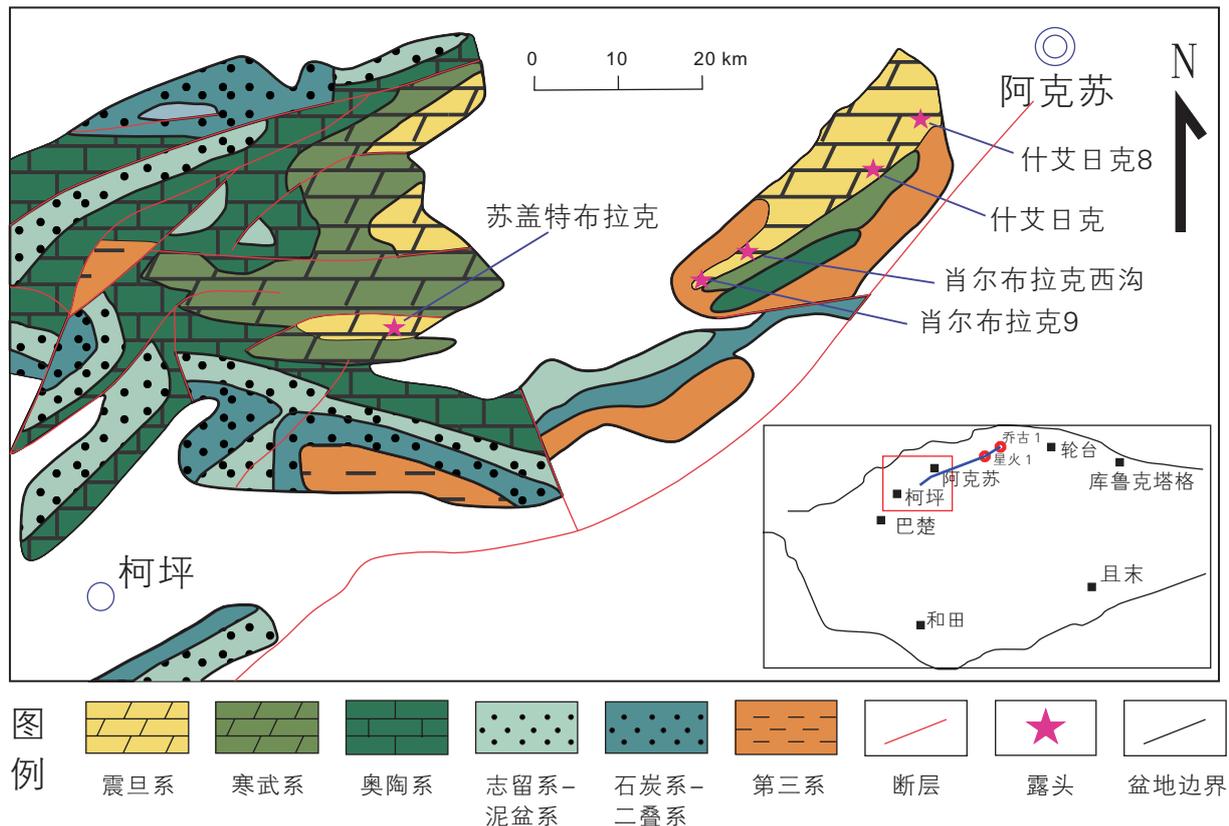


图1 塔里木盆地柯坪—阿克苏地区地层分布及露头位置(据杨云坤等^[17], 2014 修改)

Fig. 1 The stratigraphic distribution and the location of detailed maps marked of the outcrops in the Keping-Aksu areas, northwest Tarim basin (modified from YANG Yunkun et al., 2014)

热液白云石等热液矿物(图 3c, f)。溶蚀孔洞亦多发育在凝块石白云岩和叠层石白云岩中, 多个层段见其呈顺层分布(图 3d)。晶间溶孔主要发育在残余凝块石白云岩和热液白云石中(图 3e, f), 溶蚀具有非选择性。晶间孔主要发育在中、粗晶白云岩中(图 3f)。粒内溶孔、铸模孔以及粒间孔和粒间溶孔等主要分布在凝块石白云岩、鲕粒白云岩和砂屑白云岩中(图 3g, h)。裂缝主要为构造缝(图 3i), 发育程度与断层分布情况有关, 同时可见裂缝发生溶蚀形成溶缝。

2.3 地球化学特征

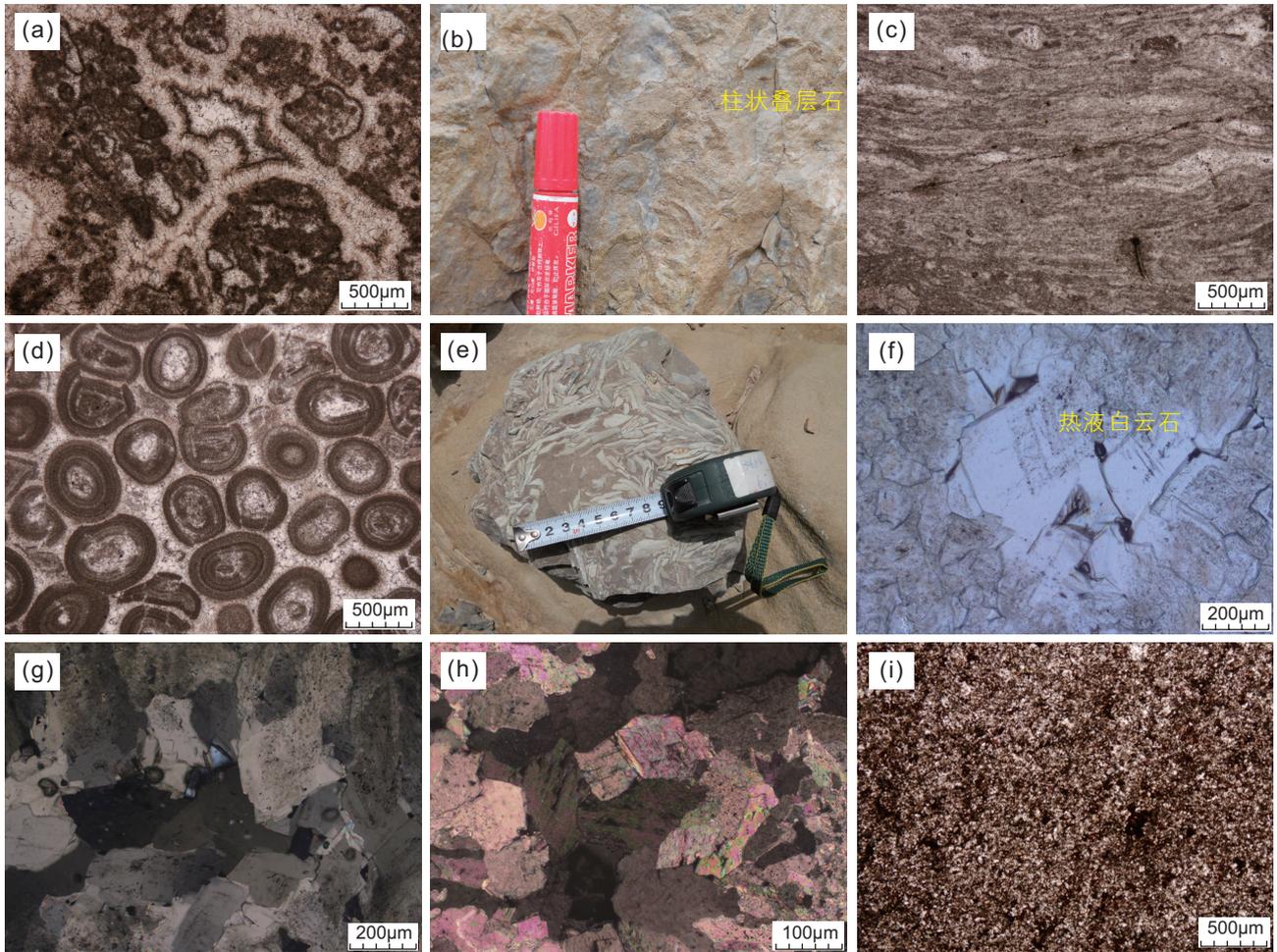
2.3.1 C-O 同位素特征

塔里木盆地柯坪—阿克苏地区 21 个露头样品 C-O 同位素测试数据显示(图 4), 微晶白云岩和颗粒白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素值接近于震旦纪海相碳酸盐岩的原始同位素值^[29], 表明白云化作用主要受海水影响, 为萨布哈白云化作用形成。中-粗晶白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值严重偏负, $\delta^{13}\text{C}$ 为正且较稳定, 表明他们形成于温度较高的埋藏环境, 通过岩石学鉴定, 中-粗晶白云

岩主要由热液白云石构成(图 2f, 图 3f), 表明其为热液白云化作用成因。粉-细晶白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负, 但较中-粗晶白云岩相对偏正, $\delta^{13}\text{C}$ 为负且相对较稳定, 表明白云化作用主要受大气淡水影响, 为混合水白云化作用形成。因此, 研究区主要发育萨布哈白云化作用、混合水白云化作用和埋藏或热液白云化作用。

2.3.2 微量元素特征

塔里木盆地柯坪—阿克苏地区 19 个白云岩样品各种结构组分微量元素测定结果显示(表 2), 微晶、鲕粒组分的特征是钠、锶高, 铁、锰中等偏低, 反映了海水特征, 与萨布哈白云化作用的岩石学和 C-O 同位素特征相一致。粉晶-细晶白云石的特征是低钠、不含锶, 铁、锰含量中等偏低, 反映大气淡水特征, 与混合水白云化作用的岩石学和 C-O 同位素特征相呼应。中-粗晶白云石为低钠、不含锶, 铁和锰含量高, 反映埋藏环境地下水特征, 与热液白云化作用的岩石学和 C-O 同位素特征对应关系好。微量元素、C-O 稳定同位素、岩石学等均表明研究区白云岩主要为萨布哈白云化作用、混合水白云化作用和热液白云化作用成因。



(a) 凝块石白云岩, 凝块石颗粒呈不规则状, 三期胶结, 肖尔布拉克西沟剖面(-); (b) 柱状叠层石白云岩, 苏盖特布拉克剖面(露头); (c) 叠层石白云岩, 鸟眼构造发育, 什艾日克剖面(-); (d) 亮晶鲕粒白云岩, 三期胶结且压实作用强烈, 什艾日克剖面(-); (e) 砾屑白云岩, 什艾日克 8 号剖面(露头); (f) 细晶白云岩中见粗晶热液白云石, 晶体呈现为自形, 白云石呈环带结构, 苏盖特布拉克剖面(-); (g) 中晶白云石, 晶体呈现为他形, 显环带结构, 苏盖特布拉克剖面(+); (h) 细晶白云石, 晶体呈现为他形, 多不显环带结构, 什艾日克剖面(+); (i) 泥-微晶白云石, 什艾日克剖面(+).

图 2 塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组岩石类型宏微观特征

Fig. 2 Photographs of the rocks of the Qigebulake formation

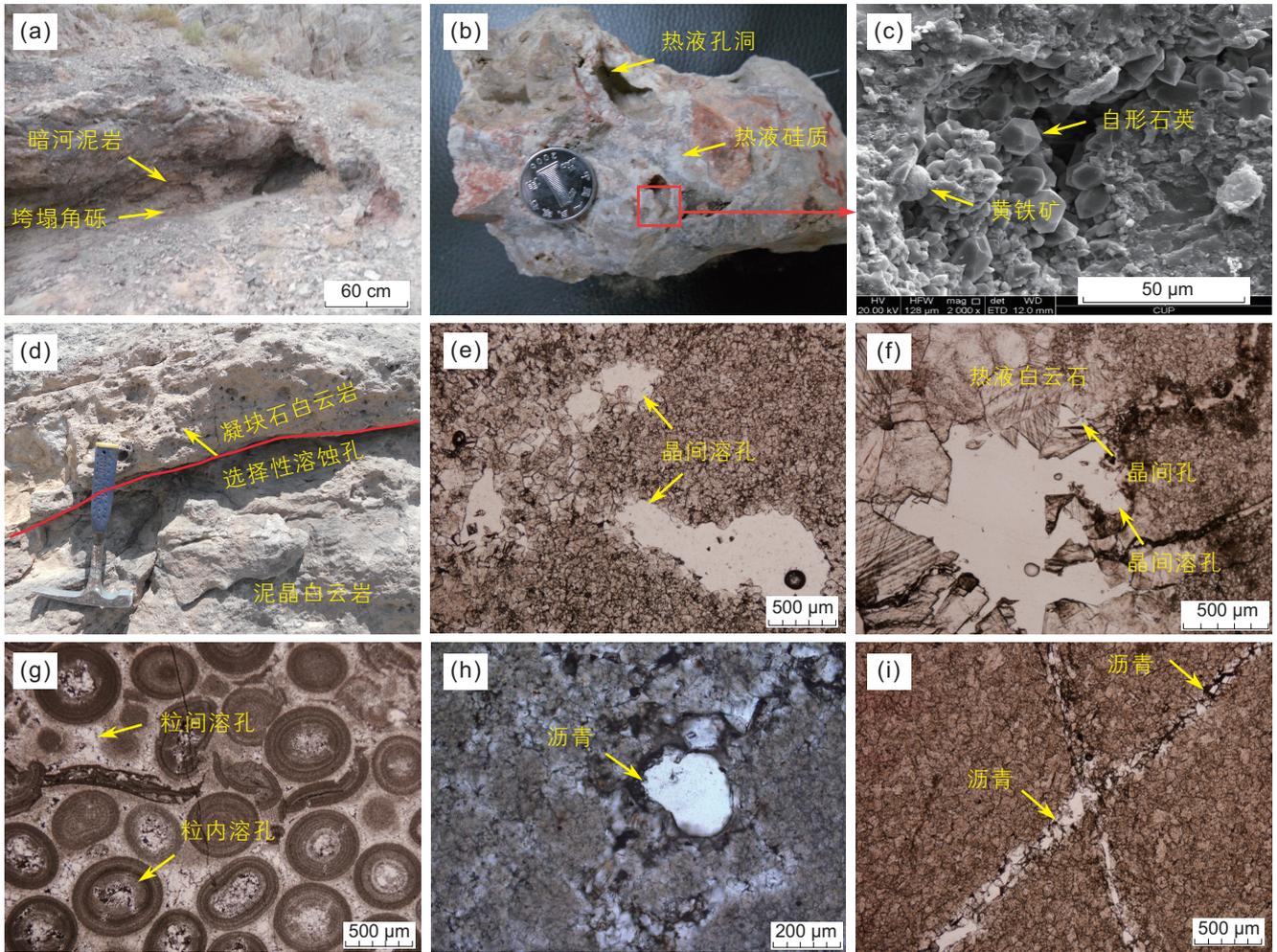
3 优质储层发育控制因素

3.1 有利岩性岩相带

奇格布拉克组不同的岩性岩相储层发育差异性较大, 优质储层主要发育在微生物礁、微生物潮坪和颗粒滩中(表 3), 这些相带沉积的凝块石白云岩、叠层石白云岩和颗粒白云岩原生粒间孔隙等发育, 为成岩流体的运移提供了良好通道, 而云坪和礁滩间海沉积的晶粒白云岩、泥晶白云岩、泥质白云岩等有效原生孔隙不发育, 缺乏成岩流体运移通道, 阻碍了成岩作

用的有效改造。在后期成岩过程中, 成岩流体则优先通过并对这些高孔渗相带沉积岩石进行有效改造, 形成优质储层, 因此, 微生物礁、微生物潮坪和颗粒滩沉积的凝块石白云岩、叠层石白云岩和颗粒白云岩是奇格布拉克组形成优质储层的良好岩性岩相。

由图 5 所示, 礁滩复合体与微生物潮坪微相在纵向上占绝对优势, 且在地层上部和中部广泛发育, 在横线上具有可对比性, 连续性好、厚度较大, 因此, 其在时间和空间分布上均为优势沉积相带。由于礁滩复合体与微生物潮坪微相为优质储层发育的良好岩性岩相带, 他们的时空分布也决定了储层发育的时空分布特征。



(a) 凝块石白云岩，溶洞为层状泥岩、沥青砂和垮塌角砾半充填，什艾日克剖面（露头）；(b) 角砾白云岩，角砾间充填物和角砾发生强烈溶蚀，砾间为热液硅质和自形石英胶结，同时发育热液溶蚀孔洞，肖尔布拉克西沟剖面（露头）；(c) 样品取自 b 中红色方框处，扫描电镜下溶孔发育，溶孔中见大量热液石英和黄铁矿充填物，肖尔布拉克西沟剖面（SEM）；(d) 凝块石白云岩中顺层溶蚀孔洞发育，下伏泥-微晶白云岩中溶蚀孔洞不发育，什艾日克剖面（露头）；(e) 残余凝块石粉晶白云岩，晶间溶孔发育，溶蚀具有非选择性，什艾日克剖面（-）；(f) 粗晶热液白云石，晶间溶孔和晶间孔发育，苏盖特布拉克剖面（-）；(g) 鲕粒白云岩，粒内溶孔发育，第二期胶结物部分发生溶蚀形成粒间溶孔，见沥青侵染，什艾日克剖面（-）；(h) 残余砂屑粉晶白云岩，见铸模孔和晶间孔，溶孔中见沥青侵染，孔壁溶蚀呈港湾状，苏盖特布拉克剖面（-）；(i) 粉晶白云岩，剪切裂缝发育，裂缝中见沥青侵染，沥青侵染处局部见白云石晶体发生溶蚀，肖尔布拉克西沟剖面（-）。

图 3 塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组储集空间宏微观特征
 Fig. 3 Photographs of reservoir porosity of the Qigebulake Formation

表 2 塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组白云岩的微量元素平均值 (ppm)(据叶德胜 [20] 修改, 1993)
 Table 2 The average value of trace elements (ppm) of the dolostones of the Qigebulake Formation (modified from Ye Desheng, 1993)

结构组分	Na ⁺	Sr ²⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺	样品数
微晶白云石	198	365	421	135	6
鲕粒	250	355	401	140	2
粉晶白云石	23	0	442	86	4
细晶白云石	36	0	371	88	2
中-粗晶白云石	33	0	855	689	5

3.2 白云化作用

前人研究表明,白云岩储层物性与白云化程度和白云石晶体大小等有关,当白云石含量小于50%时,储层孔隙度随白云石含量增加而降低;当白云石含量超过50%,储层孔隙度随白云石含量增加而增大,在白云石含量为82%~85%时孔隙度达最大,之后,随白云石含量增加储层孔隙度递减。随着白云石晶体大小由泥粉晶→粉、细晶→中、粗晶变化,晶间孔呈现为由不发育→发育→降低演化^[30-32]。

野外和镜下观察显示,塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组碳酸盐岩岩石结构组分几乎全由白云石组成,为过白云化作用形成,整体对储层孔隙贡献较小。由于研究区粉、细晶白云岩为混合水白云化作用形成,且过白云化现象严重,白云石晶体多呈现为他形(图2h, i),晶间孔隙不发育。中、粗晶白云岩为热液

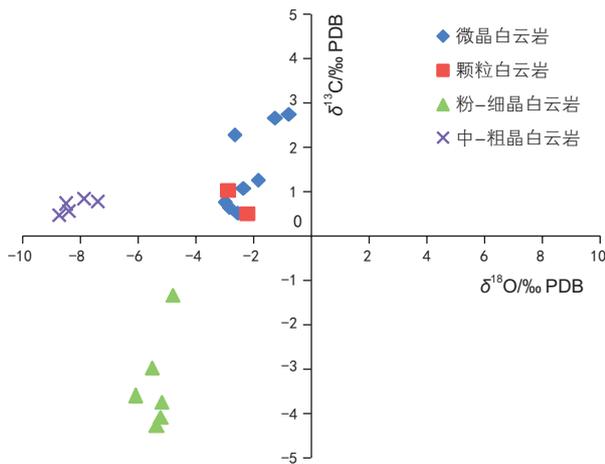


图4 塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组岩石 C-O 同位素关系图

Fig. 4 The C-O diagram of dolostones of the Qigebulake Formation

表3 塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组碳酸盐岩沉积环境和储层发育特征

Table 3 The carbonate sedimentary environment and reservoir characteristics of the Qigebulake Formation

层位	沉积微相	主要岩石类型	原生孔隙发育程度	次生孔隙类型	储层发育程度
奇格布拉克组	微生物礁	凝块石白云岩、砂屑白云岩、叠层石白云岩	发育	溶洞、溶蚀孔洞、溶蚀孔隙、晶间孔	发育
	微生物潮坪	叠层石白云岩	发育	溶蚀孔洞、溶蚀孔隙	发育
	颗粒滩	砂屑白云岩、鲕粒白云岩、砾屑白云岩	发育	溶洞、溶蚀孔洞、溶蚀孔隙	发育
	云坪	晶粒白云岩、泥晶白云岩、泥质白云岩	不发育	不发育	不发育
	礁滩间海	泥质白云岩、泥晶白云岩	不发育	不发育	不发育

白云化作用形成,晶体呈现为自形状-半自形(图2f, g),晶间孔隙发育,对储层具有一定贡献作用,但贡献率较小。泥-微晶白云岩和颗粒白云岩为萨布哈白云化作用形成,白云石晶体细小,且过白云化现象严重,尤其颗粒白云岩中白云石晶体占据粒间孔隙(图2d),使岩石孔隙减少、储层孔隙度降低。因此,研究区混合水白云化作用、萨布哈白云化作用对储层主要起破坏性作用,使岩石孔隙度降低,热液白云化作用对储层起建设性作用,但对储层孔隙的贡献较小,且分布范围也较为局限,主要分布在热液活动频繁区。

3.3 准同生溶蚀作用

晚震旦世碳酸盐岩沉积阶段,存在多期次海平面下降,使得微生物礁、微生物潮坪和颗粒滩多期次暴露在大气淡水成岩环境中,遭受富含CO₂的大气淡水淋滤,文石、高镁方解石等不稳定矿物优先发生溶蚀。准同生溶蚀作用具有岩性岩相选择性,主要发生于微生物礁、微生物潮坪和颗粒滩沉积岩石中,形成选择性溶蚀孔洞、粒内溶孔、粒间溶孔、铸模孔和鸟眼孔等(图2c; 图3d, g),而在云坪和礁滩间海等沉积岩石中不发育。准同生溶蚀作用由于持续时间短、作用深度浅,因此,形成的次生孔隙分布较为局限,同时,在埋藏过程中多发生胶结、充填,残余孔隙空间减小(图3g),使储层非均质性变强、孔隙度相对降低。准同生溶蚀对储层孔隙的贡献大于热液白云化作用,但贡献率仍然较弱,这些次生孔隙主要为后期表生溶蚀作用提供优势渗滤通道。

3.4 表生溶蚀作用

表生溶蚀作用是优质储层形成的主因。晚震旦世末期,受“柯坪运动”影响,塔里木板块整体抬升遭

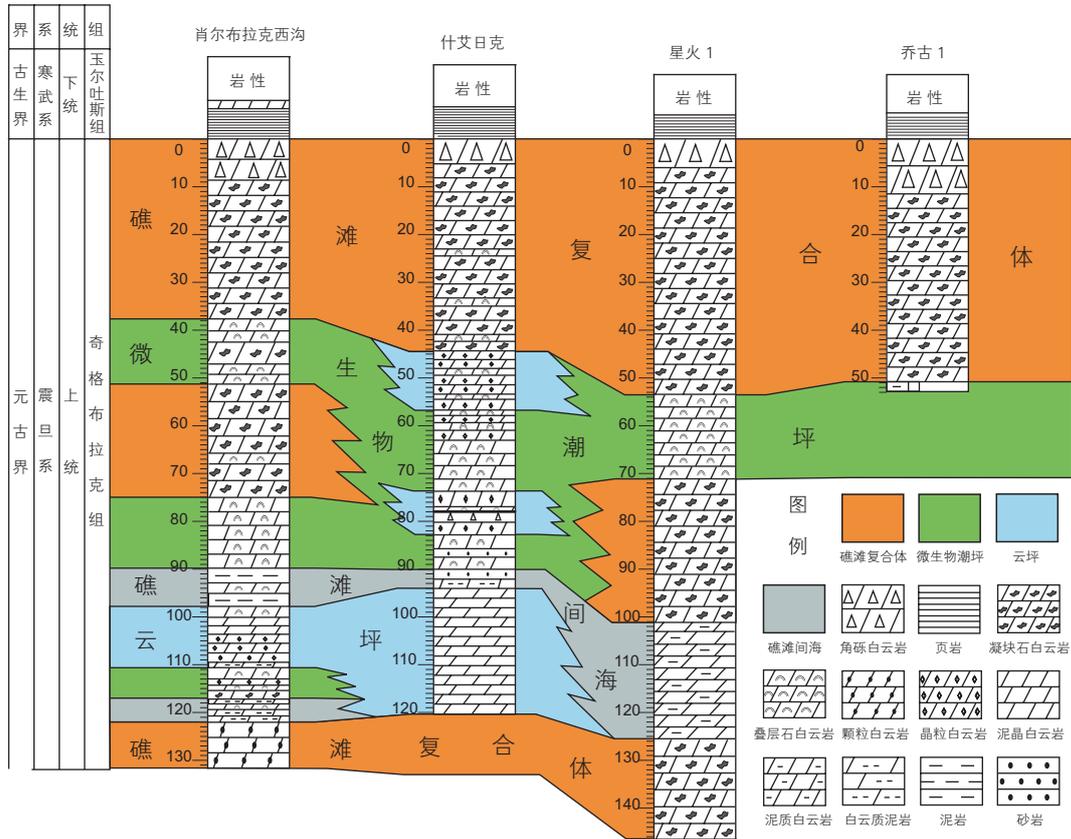


图5 塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组露头 - 钻井沉积微相对比

Fig. 5 The microfacies cross correlation between outcrops and wells of the Qigebulake Formation

受剥蚀，风化壳岩溶在区域上广泛发育^[28]。通常，一个完整的岩溶结构划分为4个带：表层岩溶带、垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带。由于晚震旦世碳酸盐台地地形平缓，地貌差异较小，野外观察和钻井揭示，表层岩溶带缺失、垂直渗流带欠发育，主要发育水平潜流带和深部缓流带，且岩溶作用深度主要在100 m范围内，水平潜流带厚度多在25 m范围内(图6)。在水平潜流带，大气淡水循环作用强，流体优先沿先期孔洞发生溶蚀，溶蚀作用强烈，非选择性溶蚀孔洞、溶孔以及大型溶洞等发育(图3a, e)，且在区域上分布稳定。其中，溶洞在宏观上呈顺层状分布，主要分布于凝块石白云岩、叠层石白云岩和颗粒白云岩中，多为垮塌角砾和暗河泥岩半充填(图3a)，在该岩溶带溶洞率普遍大于50%，自下而上，溶蚀程度增大，在什艾日克剖面，溶洞最大可达6.5 m×23.8 m。在深部缓流带，由于大气淡水循环作用受阻，溶蚀作用较水平潜流带弱，主要形成呈分散状分布的溶蚀孔洞，且多被白云石充填；虽然该岩溶带溶蚀作用总体较弱，但在大气淡水流经准同生溶蚀阶段形成的选择性溶蚀孔洞中时，流体循环作用得以加强，并对原有

孔隙进行扩容，使得储层孔隙增大、增多(图3d)。因此，表生溶蚀对优质储层的形成起了决定性作用，形成的大型溶洞、溶蚀孔洞和溶孔等为优质储层的发育提供了重要保障，他们构成了储层最为重要的储集空间，露头观察和钻井揭示，在什艾日克剖面溶洞中见有沥青砂充填物，在星火1井和乔古1井的垮塌角砾岩中见有油气显示。

3.5 热液溶蚀作用

热液活动对塔里木盆地碳酸盐岩储层起着积极的改造作用，例如，在塔北地区寒武系白云岩、塔中地区良里塔格组和鹰山组石灰岩中，多口钻井发现存在热液溶蚀，其中塔中45井主要的储层即为二叠纪热液溶蚀成因^[33]。上震旦统奇格布拉克组经历了多阶段构造运动，产生了多期火山喷发和地质热事件，由这些地质热事件产生的热液流体对储层进行了有效改造，奇格布拉克组储层遭受了奥陶纪、早二叠世和白垩纪三期地质热事件的改造，其中以早二叠世的热液溶蚀改造作用最为显著，其余两期热液溶蚀改造作用较弱。露头观察显示，在奇格布拉克组储层中热液溶蚀现象

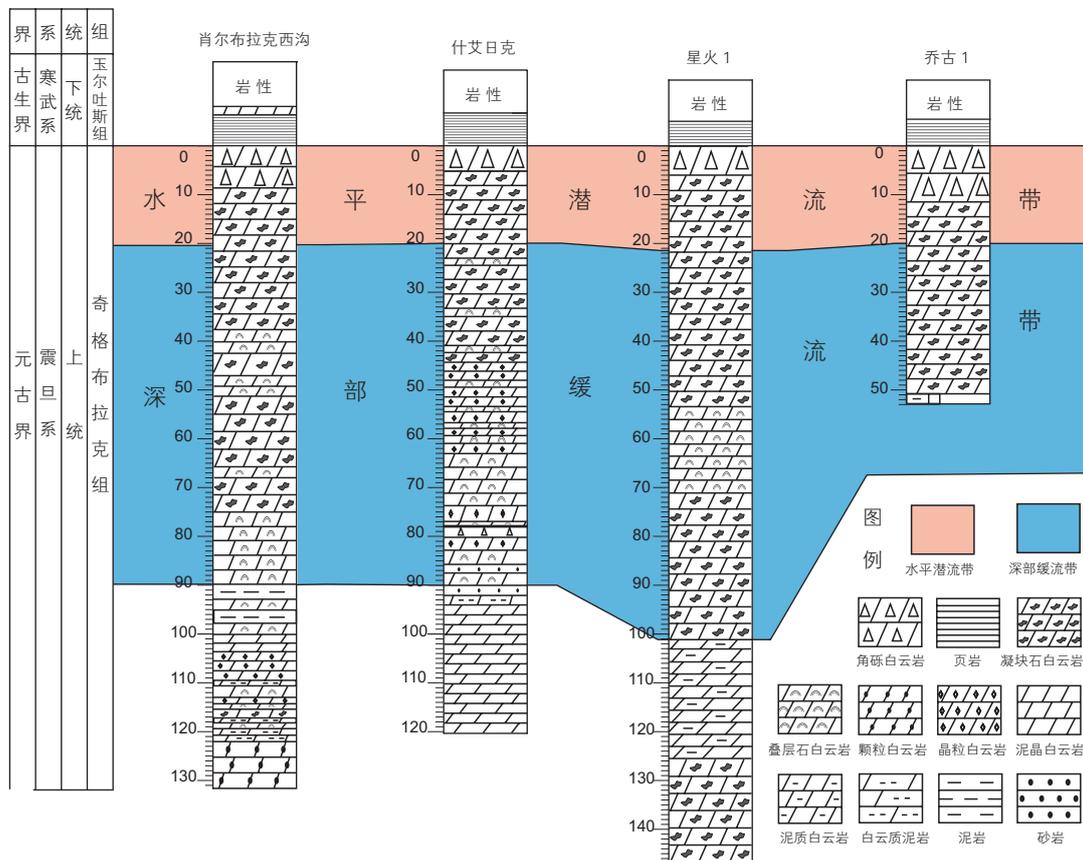


图 6 塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组露头 - 钻井岩溶特征对比

Fig. 6 The karstification cross correlation between outcrops and wells of the Qigebulake Formation

普遍，形成的热液溶蚀孔洞有效改善了储层，同时残留热液硅质、热液石英、热液白云石、黄铁矿、黄玉、阳起石、电气石、石榴石等热液矿物，作为鉴别热液溶蚀的有利证据。例如，在肖尔布拉克西沟剖面，在大型溶洞角砾充填物中，角砾间充填物和角砾边缘普遍遭受热液溶蚀，形成热液溶蚀孔洞，同时在溶蚀孔洞中残留热液硅质、自形石英和黄铁矿等热液矿物（图 3b, c），经热液溶蚀改造后，角砾间孔隙空间增大，储层得到较好改善。部分热液溶蚀孔洞中残留热液矿物较单一，热液矿物晶体间发育晶间孔，例如苏盖特布拉克剖面，热液溶蚀孔洞广泛分布，孔洞中残留热液矿物主要为热液白云石（图 3f），热液白云石间常发育晶间孔，从而形成溶孔和晶间孔相伴生，极大地增加了孔隙空间。因此，热液溶蚀对储层的发育起到了积极改善的作用，成为继表生溶蚀作用后对储层影响重大的因素之一。

3.6 有机酸溶蚀作用

烃源岩在热成熟过程中会产生大量有机酸^[34-36]，

资料表明，有机酸溶蚀可增加有效孔隙度高达 15%~20%^[37]。塔里木盆地在埋深大于 4 300 m 条件下有机酸浓度可高于 800×10^{-6} mol/L，并且随着埋深增加有机酸浓度逐渐加大^[37]，盆地内下寒武统玉尔吐斯组烃源岩埋深远远大于该值，且直接上覆于上震旦统之上，在排烃过程中，烃类和有机酸可通过断裂和不整合短距离运移至奇格布拉克组储层中，对原有孔隙空间进行扩容，增加储层有效孔隙度。有机酸溶蚀存在两种表现形式：第一，在溶蚀孔洞、孔隙等中溶蚀强度大（图 3h）；第二，在构造裂缝中溶蚀强度弱（图 3i）。这可能与裂缝主要作为流体运移通道，有机酸等酸性流体在裂缝中停留时间较短、溶蚀不充分有关，而溶蚀孔洞、孔隙等作为储层最为重要的储集空间，为有机酸等酸性流体的最终储集场所，溶蚀时间充分、进行彻底、溶蚀作用强烈，同时，有机酸在脱羧过程中会生成大量 CO_2 和 H_2O ，使地层水呈酸性，进一步增大对储层岩石的溶蚀能力，因此，有机酸溶蚀作用极大地改善了储层，为优质储层发育的另一重要因素。

3.7 构造破裂作用

露头 and 镜下观察显示, 奇格布拉克组白云岩储层裂缝系统发育, 裂缝的形成主要与晚海西期、印支期和晚燕山期的构造挤压背景有关, 形成的裂缝主要为构造缝, 开启度小, 对储集空间的贡献较小, 多作为连通孔隙的枢纽, 在一定程度上改善了储层的渗透性, 同时, 为埋藏阶段热液和有机酸提供运移通道(图 3i)。喜马拉雅期形成的裂缝通常为方解石半充填, 对改善储层的渗透性起到一定的建设作用, 但由于烃源岩大规模排烃在喜马拉雅期之前已经完成, 因此, 该期断裂对油气藏的保存可能起破坏作用。

4 优质储层形成机制

在对塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组白云岩储层发育特征及控制因素综合分析基础之上, 结合构造演化, 对优质储层的形成机制进行了讨论(图 7)。

在准同生期, 由于海平面波动频繁, 造成微生物礁、微生物潮坪和颗粒滩间歇性暴露于大气淡水环境中, 同生期已胶结的凝块石白云岩、叠层石白云岩和颗粒白云岩发生选择性溶蚀(图 7a), 形成一系列粒间

溶孔、粒内溶孔、铸模孔和鸟眼孔等(图 3d, g)。虽然早期白云化作用对储层起了破坏性作用, 但晚震旦世末期, 受“柯坪运动”影响, 塔里木板块整体抬升遭受剥蚀, 表生溶蚀作用优先沿准同生期形成的溶蚀孔洞发生溶蚀, 同时, 在水平潜流带形成大型溶洞和溶蚀孔洞等(图 3a, e), 且溶蚀作用向上依此增强(图 7b), 为优质储层形成的主要时期, 之后, 玉尔吐斯组烃源岩和上覆地层接受沉积。晚海西期, 盆地大规模逆冲断裂体系和热液活动的发生, 对奇格布拉克组储层进行了有效改造, 表现为裂缝系统的发育在一定程度上改善了储层渗透性, 热液白云化作用的发生增加了一定的晶间孔隙, 热液溶蚀作用形成了大量溶蚀孔洞, 极大地改善了储层孔隙性(图 7c), 期后, 玉尔吐斯组烃源岩大规模生排烃生成的有机酸通过断裂和不整合等运移至储层, 对原有孔隙发生扩溶, 溶蚀作用强烈(图 3h), 极大地改善了储层(图 7c)。这些成岩作用综合的结果, 形成了现今广泛发育的优质岩溶型储层。

5 结论

(1)塔里木盆地奇格布拉克组储层主要发育在凝块石白云岩、叠层石白云岩和颗粒白云岩中, 储集空间

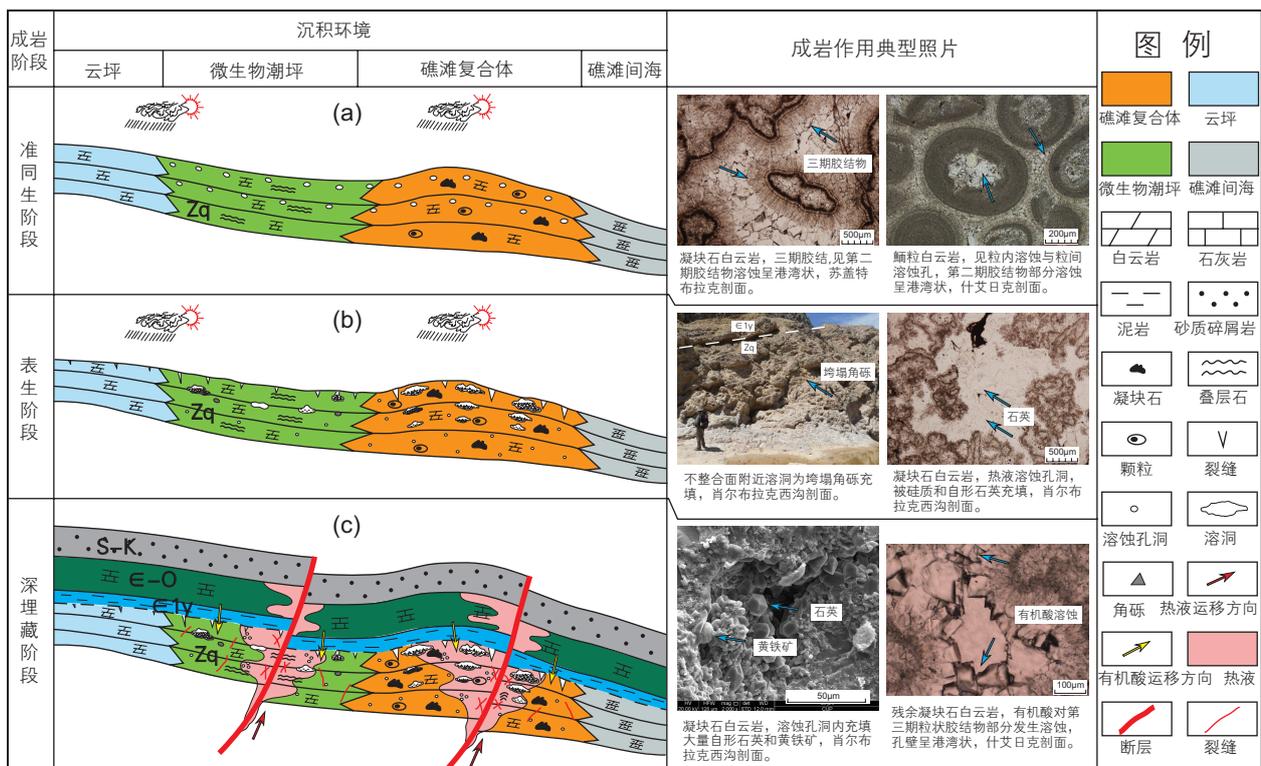


图 7 塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组储层形成演化模式

Fig. 7 The reservoir evolution model for the Qigebulake Formation

类型多样,且以溶洞、溶蚀孔洞和晶间溶孔等为主,储层主要分布在100 m以内,尤以上部25 m范围内储层最为发育。

(2)奇格布拉克组优质储层的形成是建立在微生物礁、微生物潮坪和颗粒滩有利沉积微相基础之上,受准同生溶蚀、表生溶蚀、热液溶蚀、热液白云化、有机酸溶蚀和构造破裂作用等多种因素共同作用的结果,其中,尤以表生溶蚀、热液溶蚀和有机酸溶蚀作用对储层影响最大。

(3)准同生溶蚀作用具有岩性岩相选择性,形成的溶蚀孔洞等主要为表生溶蚀提供渗流通道。震旦期末

期发生的表生溶蚀作用是储层形成的决定性因素,其优先沿准同生溶蚀孔洞发生强烈溶蚀,且自下而上溶蚀作用逐渐增强,形成大型顺层溶洞、溶蚀孔洞和晶间溶孔等,构成储层最主要的储集空间。在早二叠世热液活动广泛发育,期间发生了构造破裂、热液白云化和热液溶蚀作用,构造破裂与热液白云化作用的发生对储层起到一定改善作用,热液溶蚀作用对前期孔隙发生大规模扩溶,储层的孔隙性和连通性得到极大改善,其成为继表生溶蚀作用后又一影响储层的重要因素。期后,强烈而充分的有机酸溶蚀作用,极大程度改善了储层的孔隙性,该时期储层物性达到最佳。

参考文献

- [1] REECKMAN A, FRIEDMAN G M. Exploration for carbonate petroleum reservoirs [M]. New York, 1982: 213.
- [2] ROEHL P O, CHOQUETTE P W. Carbonate petroleum reservoirs [M]. New York: Springer_Verlag, 1985: 622.
- [3] 李德生,刘友元.中国深埋古岩溶[J].地理科学,1991,11(3):234-243. [LI D S, LIU Y Y. Deeply-buried paleokarst in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 1991, 11(3): 234-243.]
- [4] 张抗,王大锐, BRYAN G H. 塔里木盆地塔河油田奥陶系油气藏储集层特征[J].石油勘探与开发,2004,31(1):123-126. [ZHANG K, WANG D R, BRYAN G H. Reservoir characterization of the Ordovician oil and gas pools in Tahe Oilfield, Tarim Basin, Northwest China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 123-126.]
- [5] 金之钧.中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题[J].地学前缘,2005,12(3):15-22. [JIN Z J. Particularity of petroleum exploration on marine carbonate strata in China sedimentary basins [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 15-22.]
- [6] 汤良杰,吕修祥,金之钧,等.中国海相碳酸盐岩层系油气地质特点、战略选区思考及需要解决的主要地质问题[J].地质通报,2006,25(9-10):1032-1035. [TANG L J, LV X X, JIN Z J, et al. Petroleum geological characteristics strategic exploration area selection and urgent geological problem of marine carbonate sequences in China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(9-10): 1032-1035.]
- [7] DAVIES G R, SMITH J L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. American Association Of Petroleum Geologists Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.]
- [8] 马永生,郭彤楼,赵雪凤,等.普光气田深部优质白云岩储层形成机制[J].中国科学,2007,37(S2):43-52. [MA Y S, GUO T L, ZHAO X F, et al. The formation mechanism of deep dolostone reservoirs in Puguang gas field [J]. Science in China Press, 2007, 37(S2): 43-52.]
- [9] 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. [HU G, LIU W H, TENG G E, et al. Tectonic-sedimentary constrains for hydrocarbon generating organism assemblage in the lower Cambrian argillaceous source rocks, Tarim Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2014, 35(5): 685-695.]
- [10] 熊冉,周进高,倪新锋,等.塔里木盆地寒武统玉尔吐斯组烃源岩分布预测及油气勘探的意义[J].天然气工业,2015,35(10):49-56. [XIONG R, ZHOU J G, NI X F, et al. Distribution prediction of lower Cambrian Yuertusi Formation source rocks and its significance to oil and gas exploration in the Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(10): 49-56.]
- [11] 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. [LI P W, LUO P, CHEN M, et al. Characteristics and origin of the upper Sinian microbial carbonate reservoirs at the northwestern margin of Tarim Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2015, 36(3): 416-428.]
- [12] 李朋威,罗平,宋金民,等.塔里木盆地西北缘上震旦统白云岩储层特征[J].海相油气地质,2015,20(4):1-12. [LI P W, LUO P, SONG J M, et al. Characteristics of upper Sinian dolostone reservoirs in northwestern margin of Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2015, 20(4): 1-12.]
- [13] 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. [LI P W, LUO P, SONG J M, et al. Characteristics and main controlling factors of microbial carbonate reservoirs: A case study of upper Sinian-lower Cambrian in the northwestern margin of Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1074-1089.]
- [14] 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. [JIA C Z. Structural characteristics and oil/gas

- accumulative regularity in Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1999, 20(3): 177–183.]
- [15] 樊太亮, 刘金辉. 塔里木盆地北部震旦系古生界层序地层特征[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 40–47. [FAN T L, LIU J H. Sequence stratigraphic features of Sinian-paleozoic in north Tarim Basin [J]. *Oil and Gas Geology*, 1997, 18(2): 40–47.]
- [16] 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. [WANG Y, HE J Y, WEI W, et al. Study on the late Proterozoic sedimentary facies and sequence stratigraphy in Aksu Area, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(8): 2519–2528.]
- [17] 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. [YANG Y K, SHI K B, LIU B, et al. Tectono-sedimentary evolution of the Sinian in the northwest Tarim Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2014, 49(1): 19–29.]
- [18] XU B, JIAN P, ZHENG H F, et al. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Neoproterozoic volcanic rocks in the Tarim block of northwest China: Implications for the breakup of Rodinia supercontinent and Neoproterozoic glaciations [J]. *Precambrian Research*, 2005, 136(2): 107–123.
- [19] XU, B, XIAO, S H, Zou, H B, et al. Shrimp zircon U-Pb age constraints on Neoproterozoic quruqtagh diamictites in NW China [J]. *Precambrian Research*, 2009, 168(3–4): 247–258.
- [20] 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, 1(1): 1–9. [YE D S. Petrographic and geochemical characteristics of the Sinian-Ordovician dolomites in northern Tarim basin [J]. *Geochimica*, 1993, 1(1): 1–9.]
- [21] LU S, LI H, ZHANG C, et al. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim craton and surrounding continental fragments [J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1–2): 94–107.
- [22] 王小林, 胡文瑄, 陈琪, 等. 塔里木盆地柯坪地区上震旦统藻白云岩特征及其成因机理[J]. 地质学报, 2010, 84(10): 1479–1494. [WANG X L, HU W X, CHEN Q, et al. Characteristics and formation mechanism of upper Sinian algal dolomite at the Kalpin Area, Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(10): 1479–1497.]
- [23] 张增耀, 杨松岭, 赵秀岐. 塔里木盆地盆内震旦系特征[J]. 海相油气地质, 2007, 12(2): 51–56. [ZHANG Z Y, YANG S L, ZHAO X Q. Characteristics of intrabasinal sedimentary system in Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(2): 51–56.]
- [24] 何金有, 贾承造, 郭光辉, 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. [HE J Y, JIA C Z, WU G H, et al. Characteristics and model of Sinian weathering paleo-karst in Aksu Area, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(8): 2513–2518.]
- [25] 崔克信, 甄勇毅. 中国震旦纪至二叠纪古气候[J]. 地质科学, 1984, 1(1): 1–12. [CUI K X, ZENG Y Y. On the palaeoclimates from Sinian to Permian in China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1984, 1(1): 1–12.]
- [26] BERNER R A, KOTHAVALA Z. Geocarb III: a revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time [J]. *American Journal of Science*, 2001, 301(2): 182–204.
- [27] 张静, 张宝民, 单秀琴. 古气候与古海洋对碳酸盐岩储集层发育的控制[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 121–128. [ZHANG J, ZHANG B M, SHAN X Q. Controlling effects of paleo-climate and paleo-ocean on formation of carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 121–128.]
- [28] 张先树, 张书元, 张大权, 等. 塔里木盆地东北地区构造演化及其与油气的关系[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(2): 135–146. [ZHANG X S, ZHANG S Y, ZHANG D Q, et al. Tectonic evolution in northeast Tarim Basin and its relation to hydrocarbon [J]. *Oil and Gas Geology*, 1992, 13(2): 135–146.]
- [29] ZEMPOLICH W G, WILKINSON B H, LOHMANN K C. Diagenesis of late Proterozoic carbonates: The beck spring dolomite of eastern California [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1988, 58(4): 656–672.
- [30] MURRAY R C. Origin of porosity in carbonate rocks [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1960, 30(1): 59–84.
- [31] 朱井泉, 吴仕强, 王国学等. 塔里木盆地寒武—奥陶系主要白云岩类型及孔隙发育特征[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 67–79. [ZHU J Q, WU S Q, WANG G X, et al. Types and porosity characteristics of the Cambrian-Ordovician dolostones in Tarim Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2): 67–79.]
- [32] WARDLAW N C, TAYLOR R P. Mercury capillary pressure curves and the interpretation of pore structure and capillary behaviour in reservoir rocks [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1976, 24(2): 225–262.
- [33] 王嗣敏, 金之钧, 解启来. 塔里木盆地塔中45井区碳酸盐岩储层的深部流体改造作用[J]. 地质论评, 2004, 50(5): 543–547. [WANG S M, JIN Z J, XIE Q L. Transforming effect of deep fluids on carbonate reservoirs in the well tz45 region [J]. *Geological Review*, 2004, 50(5): 543–547.]
- [34] BARTH T, BJØRRLYKKE K. Organic acids from source rock maturation: Generation potentials, transport mechanisms and relevance for mineral diagenesis [J]. *Applied Geochemistry*, 1993, 8(4): 325–337.
- [35] 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 D S. Deep dissolution of Cambrian-Ordovician carbonates in the Northern Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(1): 66–71.]
- [36] 蔡春芳, 梅博文, 马亭, 等. 塔里木盆地有机酸来源、分布及对成岩作用的影响[J]. 沉积学报, 1997, 15(3): 105–111. [CAI C F, MEI

- B W, MA T, et al. The source, distribution of organic acids in oilfield waters and their effects on mineral diagenesis in Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(3): 105–111.]
- [37] 胡明毅,蔡习尧,胡忠贵,等.塔中地区奥陶系碳酸盐岩深部埋藏溶蚀作用研究[J].石油天然气学报,2009,31(6):49–54. [HU M Y, CAI X Y, HU Z G, et al. Deep buried dissolution of Ordovician carbonates in Tazhong Area of Tarim Basin [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(6): 49–54.]

The formation mechanism of high quality reservoirs in the Qigebulake Formation, Upper Sinian, Tarim Basin

YANG Fei^{1,2}, BAO Zhidong^{1,2}, PAN Wenqing³, LIU Jinxia⁴, ZHANG Demin⁵, XIAO Jing^{1,2}

1 College of Geoscience, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory for Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China

4 Sinopec Xinxing Oilfield Company, Beijing 100083, China

5 Sinopec Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China

Abstract In order to clarify the controlling factors and formation mechanism of the high quality reservoirs in the Qigebulake formation, Upper Sinian, Tarim Basin, based on the data of five Sinian outcrops and two wells, this article has analyzed the reservoir petrology, reservoir porosities and infillings, rock stable isotope and trace elements through the methods of petrology and geochemistry. The results show that the Qigebulake reservoirs are characterized by cavities, vugs and intergranular dissolution porosity development. The reservoir porosities are mainly developed in thrombolite dolostone, stromatolite dolostone and grain dolostone. On the analysis of reservoir controlling factors, it is determined that the present high quality reservoirs are modified by the diagenesis of penecontemporaneous dissolution, hypergene dissolution, hydrothermal dissolution, hydrothermal dolomitisation, organic acid dissolution, and fracturing, under the favorable sedimentary microfacies of microbial reef, microbial flat and grain-bank. The hypergene dissolution, hydrothermal dissolution and organic acid dissolution are the most significant factors for the reservoirs, among which the hypergene dissolution is critical.

Keywords controlling factors; dissolution; formation mechanism; Qigebulake Formation; Tarim Basin

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.002

(编辑 付娟娟)