

塔河油田塔深6井蓬莱坝组硅质岩成因及其地质意义

刘永立^{1,2}, 尤东华³, 高利君², 张卫峰², 谢乘飞²

[1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 中国石化西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126]

摘要:塔里木盆地奥陶统蓬莱坝组普遍为局限台地相沉积,塔河地区最为典型,前期数口钻井已揭示塔河地区蓬莱坝组以中-厚层粉-细晶白云岩为主。而其西南部的塔深6井揭示蓬莱坝组岩性差异较大,主要为砾屑白云岩、深灰色角砾状硅质和浅灰色层状硅质岩组合,其中发育一套近60 m浅灰色层状硅质岩。通过岩心观察、常规岩矿、测井和地震相分析,识别出塔深6井蓬莱坝组沉积背景为局限台地内的局部负低洼区,南北长约300 m,东西宽约200 m,台洼高差可达上百米,发生滑塌而产生角砾状硅质和砾屑白云岩的混杂堆积,并形成浅水造硅生物建造的均匀层状硅质岩,不同于周边典型的局限台地厚层白云岩组合。层状硅质岩具有中孔、低渗特征,储集空间主要为直径1~6 μm的密集微孔,见菌丝等古微生物痕迹。由此,确定塔深6井蓬莱坝组硅质岩主要由沉积地形诱发的机械垮塌破碎和浅水-半深水生物成因,对于丰富和深化塔里木盆地奥陶系沉积演化和储层成因具有重要意义。

关键词:硅质岩;砾屑白云岩;塔深6井;蓬莱坝组;下奥陶统;塔河油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Genesis and geological significance of siliceous rock in Penglaiba Formation in Well Tashen 6, Tahe oilfield

Liu Yongli^{1,2}, You Donghua³, Gao Lijun², Zhang Weifeng², Xie Chengfei²

[1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Northwest Oilfield Branch of SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China]

Abstract: Restricted platform facies is common in the Penglaiba Formation of the Lower Ordovician in the Tarim Basin. This is especially true in Tahe area, where the early drilling data reveal that the Penglaiba Formation is mainly composed of moderate-to-thick-bedded very fine to fine crystalline dolomites. However, drilling data of Well Tashen 6 in the southwest of Tahe area reveal that the Penglaiba Formation is quite heterogeneous in terms of lithology in this area and is mainly composed of intraclast dolostones, dark gray brecciated siliceous rocks and light gray laminar siliceous rocks, within which a set of light gray laminar siliceous rocks of nearly 60 m in thickness was developed. Through core observation, conventional thin section examination, well logging and seismic facies analyses, we identified that the sedimentary setting of Penglaiba Formation in Well Tashen 6 is locally low within the restricted platform, about 300 m long from north to south and 200 m wide from east to west, with a higher relief up to hundreds of meters. Therefore, the collapse therein could produce a mixed accumulation of brecciated siliceous rocks and intraclast dolostones, and form homogeneous laminar siliceous rocks constructed by shallow-water silicogenic organisms, quite different from the thick-bedded dolomite assemblage of the surrounding restricted platform typical in the area. The laminar siliceous rocks are characterized by medium porosity and lower permeability as well as reservoir space dominated by massive micropores with a diameter of 1–6 μm. And traces of ancient microorganisms such as hyphae are seen therein. In conclusion, it can be confirmed that the siliceous rocks in the Penglaiba Formation in Well Tashen 6 are mainly of mechanical collapse origin induced by the special topography and shallow-to-semi-deep water biogenesis. This is of great significance to enriching and deepening understanding of

收稿日期:2019-08-26;修订日期:2019-10-12。

第一作者简介:刘永立(1982—),男,硕士、副研究员,碳酸盐岩沉积与储层研究。E-mail:liuyongli526@126.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05005-002);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB214800)。

the Ordovician sedimentary evolution and reservoir genetic mechanism in the Tarim Basin.

Key words: siliceous rock, intraclast dolomite, Well Tashen 6, Penglaiba Formation, Lower Ordovician, Tahe oilfield, Tarim Basin

近年来,塔里木盆地深层碳酸盐岩油气勘探一直备受关注,尤其是寒武系—下奥陶统白云岩领域,除了在塔北古潜山区和塔中古潜山区获得一定范围的油气成果外,构造相对平缓的台盆区尚未获得规模油气发现。塔里木盆地台盆区下奥陶统蓬莱坝组普遍发育局限台地相白云岩,塔河地区较为典型,沙88井、塔深1井和塔深2井均在蓬莱坝组揭示厚层状白云岩。前人对蓬莱坝组岩相和沉积相进行了一些研究^[1-4],基本认识趋于一致。高志前等^[3]认为台盆区晚寒武世—早中奥陶世为弱镶边斜坡型碳酸盐岩台地;熊冉等^[4]也对整个盆地蓬莱坝组沉积相进行了分析,认为塔北地区早奥陶世总体水体较浅,发育局限台地相。

海相碳酸盐岩中硅质岩较为常见,其成因主要分为4种:生物或生物化学成因的(层状)硅质岩、化学沉积成因的层状硅质岩、机械作用形成的硅质岩、以及富硅质流体(热液)交代成因的硅质岩。塔里木盆地寒武系—奥陶系硅质岩分布普遍,前期研究主要集中在寒武系硅质岩,特别是寒武系底部玉尔吐斯组(烺源岩层系),中—下奥陶统硅质岩也有部分涉及,成因看法存在一定争议。李庆^[5]、杨程宇^[6]提出塔里木盆地西北缘玉尔吐斯组层状硅质岩为热水沉积成因,而杨宗玉^[7]认为玉尔吐斯组薄层状硅质岩以(微)生物化学作用为主,机械作用和后期交代作用为次的综合成因模式。杨瑞东^[8]、陈永权^[9]利用元素与同位素等地球化学方法,提出塔里木盆地东部下寒武统层状硅质岩为沉积成因,中、西部寒武系台地相中硅化岩与深部硅化流体交代作用相关。朱东亚^[10]、李映涛^[11]、洪才均^[12]指出台盆区寒武系—奥陶系碳酸盐岩中发育岩浆热液成因的硅质岩和硅化现象。袁雪君^[13]发现塔北跃进地区中奥陶统一间房组硅质结核中的微体生物化石组合以营浮游生活的疑源类和营底栖生活的丝状蓝藻化石为主,反映了中奥陶统开阔台地发育生物成因的硅质结核。关于塔里木盆地硅质岩储集性能方面的研究相对较少,李映涛^[11]、傅恒^[14]提出了塔中北坡顺南地区鹰山组发育热液硅化作用形成的硅质岩裂缝孔洞型储层,陆朋朋^[15]对塔里木盆地西北缘露头区蓬莱坝组发育硅质岩裂缝型储层进行了简单阐述。

塔河油田西南部的塔深6井在蓬莱坝组揭示不同的岩性组合,主要为砾屑白云岩、深灰色角砾状硅质和浅灰色层状硅质岩,且浅灰色层状硅质岩具有一定的

储集性能。本文通过三维地震、岩心、薄片和扫描电镜等观测方法手段,对塔深6井独特的岩性组合进行分析,提出蓬莱坝组硅质岩以生物成因和机械滑塌作用为主,进一步深化了塔河油田下奥陶统沉积演化和储层发育模式,从而为塔里木盆地超深层油气勘探提供了理论基础。

1 蓬莱坝组沉积背景

塔河油田位于塔里木盆地北部沙雅隆起阿克库勒凸起主体部位,为中国最大的古生界海相碳酸盐岩油气田^[16]。阿克库勒凸起在前期稳定的寒武系—奥陶系碳酸盐岩台地基础上,后期经历了加里东中晚期—海西期构造运动而形成了北东向展布的古鼻凸,并伴随了中—下奥陶统顶部古岩溶缝洞型储集体群的形成过程。

寒武纪—中奥陶世末,塔河地区一直处于塔里木克拉通东北部,沉降速率稳定,发育了寒武系—中下奥陶统近3 000 m巨厚的碳酸盐岩沉积。寒武纪塔河地区自西向东横向跨越了台地—台缘—斜坡相区及典型的进积型台地发展,发育了从下寒武统缓坡台地相到中—上寒武统大型镶边台地相的纵向沉积序列^[3,17],主要为局限水体作用下的大套白云岩沉积层系。到早—中奥陶世,塔河地区基本继承了晚寒武世碳酸盐岩台地的古地理格局,但海平面缓慢上升,水体由局限条件逐渐向半局限—开阔条件转变,自下而上形成了下奥陶统蓬莱坝组局限台地相白云岩层段(图1,图2)、中—下奥陶统鹰山组下段半局限—半开阔台地相灰质云岩—云质灰岩互层段、鹰山组上段—一间房组开阔台地相纯灰岩段的纵向台地沉积类型和岩性组合序列。

2 塔深6井蓬莱坝组特征

沙88井、塔深1井、于奇6井和塔深2井等前期钻井,揭示蓬莱坝组除顶部夹薄层灰岩外,整体发育黄灰色、浅灰色薄层状—块状含灰质粉细晶白云岩、粉细晶白云岩,局部见中晶白云岩和少许深灰色或灰白色硅质团块。

塔深6井位于塔河地区西南部,蓬莱坝组发育深

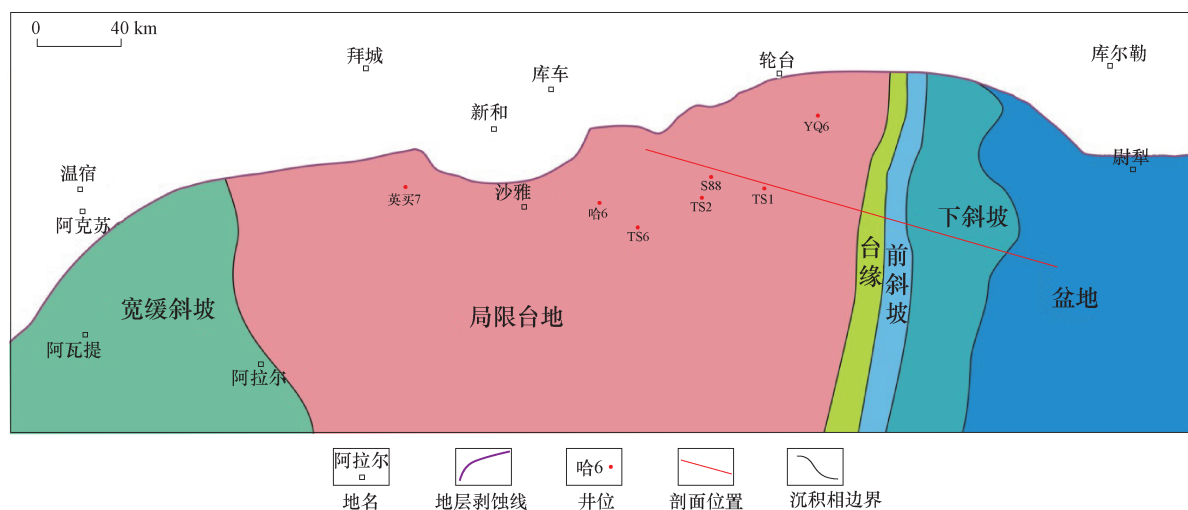


图1 塔北地区下奥陶统蓬莱坝组沉积相

Fig. 1 Sedimentary facies of the Penglaiba Formation in the Lower Ordovician, Tabei area

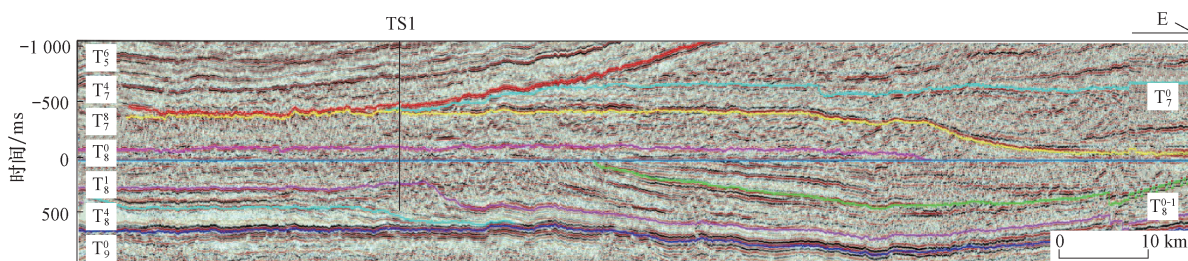


图2 塔河油田寒武系-中下奥陶统沉积相带东西向展布典型地震剖面(拉平寒武系顶面,剖面位置见图1)

Fig.2 Typical E-W seismic profiles of the sedimentary facies zone of the Cambrian and Middle-to-Lower Ordovician, Tahe oilfield
(flattened on top Cambrian, see Fig. 1 for the profile location)

T₉⁰. 震旦系顶面; T₈⁴. 寒武下统肖尔布拉克组顶面; T₈¹. 中寒武统顶面; T₈⁰⁻¹. 上寒武统下丘里塔格群顶面; T₈⁰. 寒武系顶面;

T₇⁸. 下奥陶统蓬莱坝组顶面; T₇⁴. 中奥陶统一间房组顶面; T₇⁰. 奥陶系顶面; T₅⁶. 石炭系巴楚组顶面

灰色或灰白色角砾状硅质岩、灰色层状硅质岩、灰色砾屑白云岩、浅灰色含灰质粉细晶白云岩,以及粉细晶白云岩,其岩性组合特征与前期钻井差异性较大,尤其是整体发育不同类型、不同规模的硅质岩和砾屑白云岩(图3)。

2.1 硅质岩

塔深6井蓬莱坝组硅质岩非常丰富,与前期钻井揭示岩性存在较大差别,主要分为3种类型:深灰色硅质团块、深灰色或浅灰色角砾状硅质岩和灰色均匀层状硅质岩。前期台盆区钻井蓬莱坝组硅质团块较为常见,角砾状硅质岩少见,但均匀层状硅质岩从未发现过。

1) 深灰色硅质团块

寒武系顶部、蓬莱坝组和鹰山组顶部均有不同程度发育(图3),直径多超过10 cm(图4),岩性致密,物性差,硅质为隐晶质,直接产于黄灰色含灰质白云岩或

白云岩之中,边界平滑,两者之间无胶结物,局部被后期高角度构造裂隙切割,充填方解石。该类型硅质岩在塔河地区上部地层鹰山组和一间房组中较为常见,应为沉积-成岩早期形成^[3,17]。

2) 深灰色或浅灰色角砾状硅质岩

角砾大小不一(图4),长轴0.5~5 cm不等,形状多样,边界极不规则,棱角分明,无磨圆现象,杂乱无章,无定向排列现象。该类型硅质岩分布最为普遍,多以镶嵌状分布于黄灰色含灰质白云岩或白云岩中,与围岩之间无胶结物(图4c,e),局部角砾(第4回次岩心顶部,图4d)之间点接触,局部见方解石充填,且深灰色角砾状硅质与深灰色硅质团块岩性和微观结构相似,两者常伴生,均为隐晶质。该类型硅质岩在塔深6井蓬莱坝组中、下部最为发育(图3),上部夹杂于层状硅质岩之间。在塔河地区前期寒武-奥陶系钻井中极为少见,推测深灰色或浅灰色角砾状硅质岩为沉积-成岩早期机械破碎后,再沉积所致。

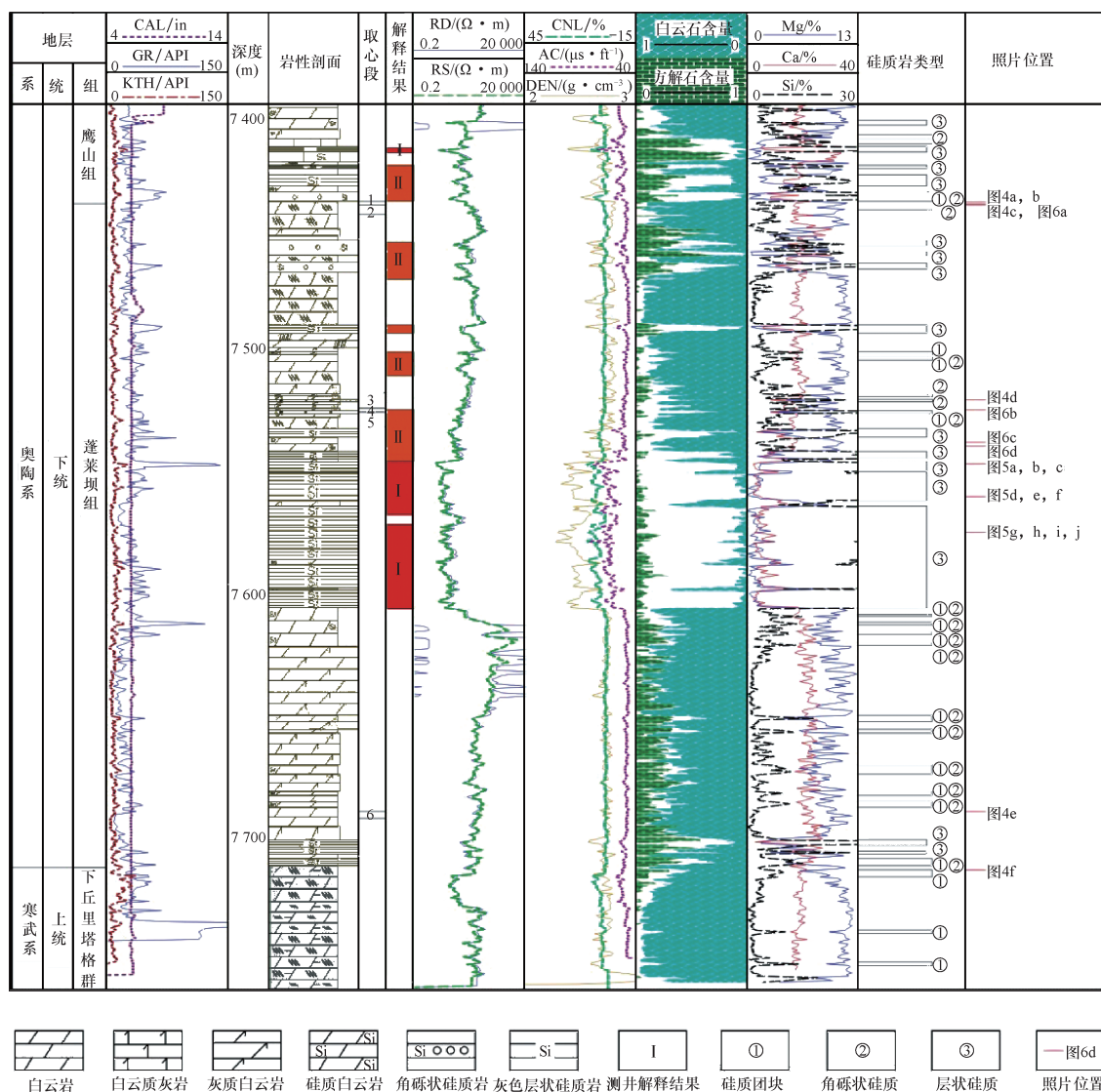


图3 塔河油田塔深6井奥陶系蓬莱坝组综合柱状图

Fig. 3 The composite column of the Ordovician Penglaiba Formation in Well Tashen 6, Tahe oilfield

3) 灰色均匀层状硅质岩

集中分布于蓬莱坝组中、上部至鹰山组底部(图5), 其中, 单层厚度最大可达60 m左右, 上部呈薄夹层状产出(图3)。均匀层状硅质岩, 纹层发育(图5b, e), 纹层厚度小于1 mm, 硅质多为隐晶质, 具有一定的储集性能, 储集空间为相对孤立的晶间微孔(图5c, f, g), 单个微孔直径多为1~6 μm , 沿纹层定向排列, 微孔中未见明显充填物。其实测孔隙度为11.0%~17.4%, 渗透率为 $0.03 \times 10^{-3} \sim 0.36 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 中孔、低渗特征, 取心后久置见原油外渗。另外, 扫描电镜观察在700~4 000放大倍数下, 见微生物菌丝(图5h—j)。该类型硅质岩可能与古生物有关。该类型硅质岩和中孔低渗的硅质储层, 在塔河地区, 乃至塔里木盆地前期寒武系—奥陶系钻井中均未见到^[5-15], 具有一定特殊性。

2.2 砾屑白云岩

属于碎屑白云岩中常见的一种^[18-20]。碎屑白云岩由浅水潟湖或局限台地的白云岩碎屑, 经过干裂、潮汐或风暴作用等, 搬运至较深水区(如台缘斜坡、潟湖等)再沉积, 形成夹层或浊积扇, 往往和灰泥碎屑混在一起。

砾屑白云岩是塔深6井蓬莱坝组另一典型岩性(图6a, b), 与角砾状硅质岩相伴生, 两者结构具有一定相似性, 白云质角砾大小不一, 长轴1~10 cm不等, 形状多样, 边界极不规则, 棱角分明, 局部与硅质角砾共生, 混杂堆积。砾屑白云岩分布较为普遍, 在蓬莱坝组整套地层中不同程度发育, 指示了塔深6井在早奥陶世蓬莱坝组沉积期可能一直处于碳酸盐岩台地水动力较弱的相对深水区。



图4 塔河油田塔深6井蓬莱坝组典型硅质团块(a,b)和角砾状硅质岩(c—f)岩心照片及岩石薄片照片

Fig.4 Core and thin section photos of typical siliceous mass(a,b)and brecciated siliceous rock(c—f)in the Penglaiba Formation in Well Tashen 6, Tahe oilfield

a. 深灰色硅质团块,黄灰色灰质白云岩,被高角度构造裂缝切割,方解石全充填,埋深7 440.00~7 440.22 m;b. 隐晶质硅质,微裂缝发育,埋深7 440.00 m;c. 浅灰色不规则角砾状硅质,杂乱分布,无分选,埋深7 441.94~7 442.34 m;d. 深灰色角砾状硅质岩,上部为点接触,之间充填方解石,下部呈长条状或竹叶状,嵌入式分布于基岩中,杂乱分布,埋深7 524.63~7 524.92 m;e. 灰色粉细晶砾屑白云岩,局部夹深灰色不规则角砾状硅质,杂乱分布,无分选,埋深7 690.40~7 690.47 m;f. 井壁取心,灰色粉细晶白云岩,夹深灰色角砾状硅质,埋深7 716.48 m

2.3 滑塌构造

也称水底滑坡构造^[9-10],通常是指碎屑岩或碳酸盐岩沉积物在斜坡上受重力或其它外力驱使发生运动和位移所产生的各种同生变形构造,常表现为塑性变形,伴随小型断裂和角砾化及岩性混杂等现象,分布范围从局部到数百米、上千米不等。其与水底斜坡有关,主要发生于三角洲前缘、碳酸盐岩台缘斜坡和海底峡谷等。

塔深6井蓬莱坝组中、上部局部层段发育滑塌构造,如第3~4回次取心段(图6c,d),围岩中层面和基质发生塑性流动混迹,尤其是层面扭曲明显,层间厚度差异较大,夹砾屑白云岩和角砾状硅质。典型滑塌构造,证明塔深6井当时可能处于存在一定坡度的斜坡区,造成了早期沉积物失稳。

3 地震反射结构

塔河地区蓬莱坝组全区展布比较稳定,地层厚度在350 m左右。前期塔深1井、于奇6井、塔深2井和塔深6井均揭穿蓬莱坝组,厚度分别为345,395,363和276 m,以塔深6井地层厚度最薄。

塔河地区蓬莱坝组整体地震反射结构平稳,表现为3根连续性较好的同相轴,中、上部短连续的强弱反射相间,下部强反射连续较好。而塔深6井蓬莱坝组目标类型,表现为两根短轴状“下凹型”强反射同相轴(图7a,b),且时窗跨度约为80 ms,明显低于周边正常地层反射区时窗跨度的100 ms。因此,进一步证实塔深6井蓬莱坝组厚度存在突变,薄于周边。

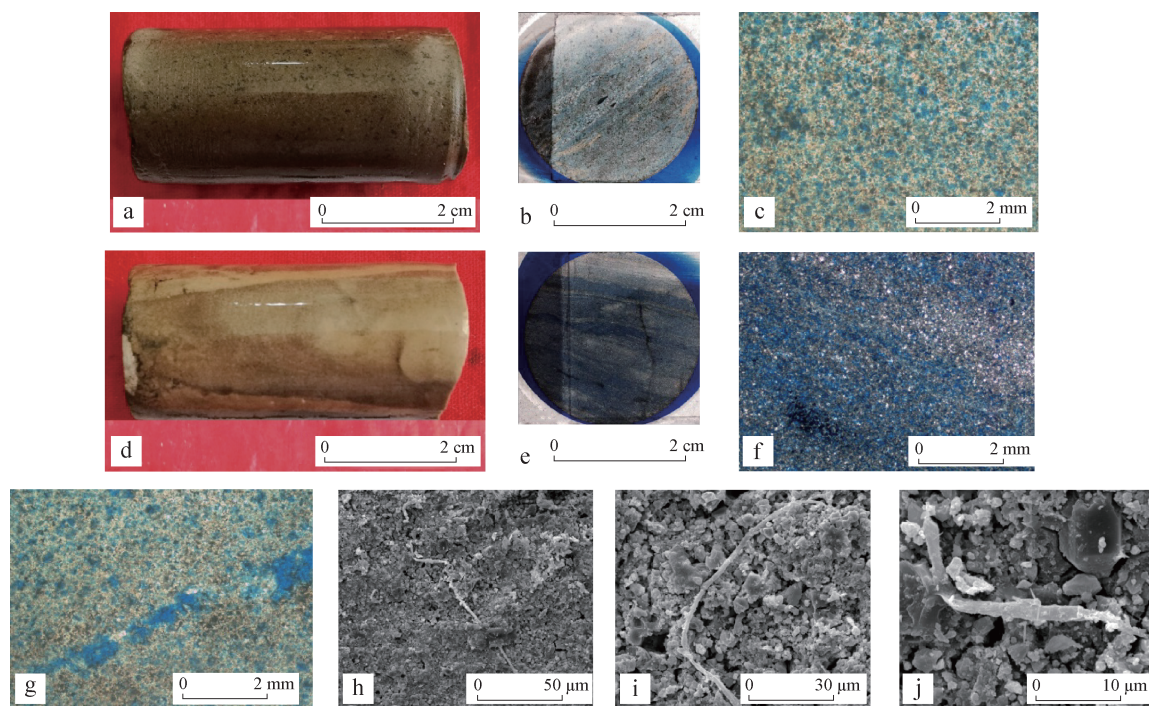


图5 塔河油田塔深6井蓬莱坝组典型均匀层状硅质岩心照片(井壁取心)及其显微特征照片

Fig. 5 Core (sidewall coring) photos and microscopic photos of typical lamellar homogeneous siliceous rocks in the Penglaiba Formation in Well Tashen 6, Tahe oilfield

a. 硅质岩,久置原油外渗,埋深7 547.47 m; b. 铸体薄片照片重构,微孔顺层分布,埋深7 547.47 m; c. 微孔发育,面孔率20%,浸染状,埋深7 547.47 m; d. 层状硅质岩,原油外渗,埋深7 561.49 m; e. 铸体薄片照片重构,微孔顺层分布,埋深7 561.49 m; f. 微孔发育,面孔率20%,浸染状,埋深7 561.49 m; g. 硅质岩,微孔、裂缝状溶孔发育,孔隙度为12.3%,渗透率为 $0.09 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,埋深7 576.71 m; h. 硅质岩,微孔发育,见微生物菌丝,埋深7 576.71 m; i. 硅质岩,微孔发育,见微生物菌丝,埋深7 576.71 m; j. 硅质岩,微孔发育,见微生物菌丝,埋深7 576.71 m



图6 塔河油田塔深6井蓬莱坝组典型砾屑白云岩(a,b)和滑塌沉积构造(c,d)岩心照片

Fig. 6 Core photos showing typical intraclast dolomite (a, b) and slumping structures (c, d) in the Penglaiba Formation in Well Tashen 6, Tahe oilfield

a. 灰色砾屑白云岩,夹灰色角砾状硅质不均匀分布,下部发育滑塌构造,埋深7 442.34 ~ 7 442.55 m; b. 灰色砾屑白云岩,有竹叶状特征,局部见角砾状硅质,两者直接接触,无明显胶结物,埋深7 526.81 ~ 7 526.91 m; c. 滑塌构造,基质塑性变形,夹灰色砾屑白云岩和少量深灰色角砾状硅质,埋深7 519.17 ~ 7 519.36 m; d. 滑塌构造,基质和层间泥质塑性变形,夹灰色砾屑白云岩和少量深灰色角砾状硅质,埋深7 520.12 ~ 7 520.26 m

利用层拉平技术,分别拉平寒武系顶面和鹰山组下段顶面进行对比(图7a,图7b,图8a,图8b),发现塔深6井区晚寒武世为正常台地沉积区,同相轴基本趋于平行。早奥陶世逐步形成了一个近似椭圆形的局部

负地形,南北长约300 m,东西宽约200 m,为局限台地内部的局部低洼深水区。由于比正常沉积地层薄近80 m(图7a),忽略压实矫正,蓬莱坝组沉积末期,水体比局限台地深至少80 m。鹰山组沉积早期,局部低洼

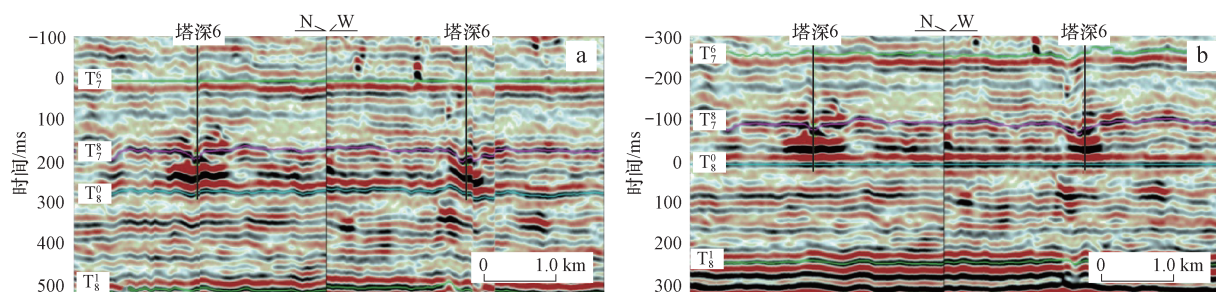


图7 塔河油田过塔深6井蓬莱坝组南北向和东西向时间地震偏移剖面

Fig. 7 The N-S and E-W time migrated seismic profiles of the Penglaiba Formation across Well Tashen 6, Tahe oilfield

a. 拉平 T_7^0 (鹰山组下段顶面); b. 拉平 T_8^0 (寒武系顶面)

T_8^S . 中寒武统顶面; T_8^0 . 寒武系顶面; T_7^S . 下奥陶统蓬莱坝组顶面; T_7^0 . 中-下奥陶统系统鹰山组下段顶面

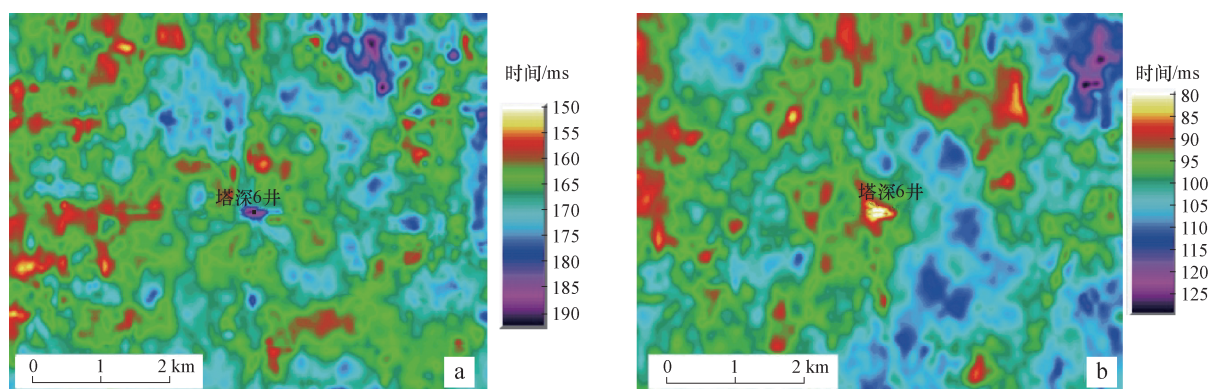
图8 塔河油田塔深6井区重要层系等 t_0 视厚度图

Fig. 8 Iso- t_0 apparent thickness diagram of the important sequences in area around Well Tashen 6, Tahe oilfield

a. 蓬莱坝组; b. 鹰山组下段

区被上覆地层填平补齐,恢复为正常台地沉积区,鹰山组下段中、上部同相轴基本趋于平行。

4 硅质岩成因

早奥陶世,塔河地区西南部蓬莱坝组局限台地背景下,塔深6井附近形成了一个局部低洼区,其沉积速度低于正常台地区。随着地层稳定沉积,沉积物表面地形高差不断扩大,局限台地上形成的白云岩和硅质团块在一定范围内沿着斜坡向水体较深的低洼区进行滑动迁移,发育典型的滑塌构造和破碎作用,伴生了丰富的砾屑白云岩与角砾状硅质混杂堆积(图9),及多种岩性突变接触面。

硅质岩既有深水沉积,也有浅水沉积^[18-19,21-30],比如意大利侏罗纪放射虫燧石岩便属于浅水潮坪沉积。曾允孚^[19]根据现代海洋沉积研究,从120~180 m和上千米深处所得到的硅质浮游生物资料的一致性,提出浅水生物硅质岩的存在是可能的。

蓬莱坝组沉积中期,塔深6井附近台洼高差继续扩大,达到数十米至上百米,低洼区开始沉积古老浅水

造硅生物建造的均匀层状硅质岩,发育密集的微孔隙,并残留了菌丝等古生物痕迹。而后低洼区继续发育滑塌构造和均匀层状硅质岩交互出现的沉积结构,一直持续至鹰山组沉积早期逐渐被填平补齐。

5 结论

1)塔深6井蓬莱坝组揭示了一套以不同类型硅质岩为特色的岩性组合和滑塌构造,且地层厚度比周边薄80 m左右,主要发育角砾状硅质、均匀层状硅质和砾屑白云岩的岩性组合,特别是近60 m具有中孔、低渗物性的层状硅质储层,与周边典型局限台地区厚层白云岩序列不同。

2)塔深6井蓬莱坝期为局限台地背景下的局部低洼区,南北长约300 m,东西宽约200 m,台洼高差可达上百米,发生滑塌而产生角砾状硅质和砾屑白云岩的混杂堆积,并形成浅水造硅生物建造的均匀层状硅质岩,而后该低洼区被上覆鹰山组填平补齐。

3)塔深6井蓬莱坝组硅质岩由沉积地形诱发的机械垮塌破碎和浅水-半深水生物成因为主,具有一定

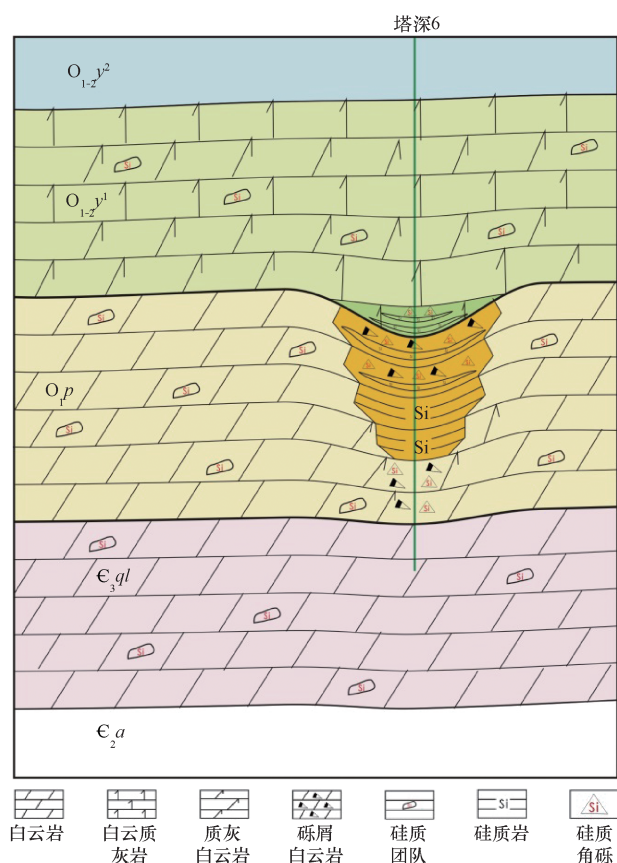


图9 塔河油田塔深6井蓬莱坝组岩性组合示意图

Fig. 9 A schematic diagram of lithological combination of the Penglaiba Formation in Well Tashen 6, Tahe oilfield

$O_{1-2}y^1$. 中-下奥陶统鹰山组上段; $O_{1-2}y^2$. 中-下奥陶统鹰山组下段;
 O_{1p} . 下奥陶统蓬莱坝组; C_3ql . 上寒武统下丘里塔格群; C_2a . 中寒武统阿瓦塔格组

的特殊性。前期学者总结和提出了多种碳酸盐岩沉积模式,并阐述相-亚相的分类标准,但从未涉及类似塔深6井蓬莱坝组沉积样式,古陆表海局限台地内部局部低洼区出现滑塌白云岩-硅质岩和沉积型硅质岩,其古水深变化、沉积相和岩性序列等均有待于深入研究,对于深化和丰富塔里木盆地寒武系-奥陶系碳酸盐岩台地沉积环境和演化规律,特别是分析下奥陶统白云岩发育背景,具有重要的参考意义。

致谢:中国石化集团公司总经理马永生院士和油田事业部副主任蔡勋育教授亲临生产现场进行详细观察和探讨,并提出宝贵意见和建议;科技部副任何治亮教授和同仁们在成果交流中给予悉心指导,使我们对这一科学问题的认识得到很大提高,在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 冯增昭,鲍志东,吴茂炳,等. 塔里木地区寒武纪和奥陶纪岩相古地理[M]. 北京:地质出版社,2005:1-179.
- [2] 许效松,刘宝珺,牟传龙,等. 中国中西部海相盆地分析与油气资源[M]. 北京:地质出版社,2005:41-118.
- [3] 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.
- [4] 熊冉,张天付,乔占峰,等. 塔里木盆地奥陶系蓬莱坝组碳酸盐岩缓坡沉积特征及油气勘探意义[J]. 沉积与特提斯地质,2019,39(1):42-49.
- [5] 李庆,胡文瑄,张军涛,等. 塔里木盆地西北缘中寒武统硅质岩特征与形成环境[J]. 矿物学报,2010,30(3):293-303.
- [6] 杨程宇,李美俊,倪智勇,等. 塔里木盆地西北缘玉尔吐斯组硅质岩成因及石油地质意义[J]. 沉积学报,2016,34(4):653-661.
- [7] 杨宗玉,罗平,刘波,等. 塔里木盆地阿克苏地区下寒武统玉尔吐斯组硅质岩分类及成因[J]. 地质前缘,2017,24(5):245-264.
- [8] 杨瑞东,张传林,罗新荣,等. 新疆库鲁克塔格地区早寒武世硅质岩地球化学特征及其意义[J]. 地质学报,2006,80(4):598-605.
- [9] 陈永权,蒋少涌,周新源,等. 塔里木盆地寒武系层状硅质岩与硅化岩的元素、 $\delta^{30}\text{Si}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 地球化学研究[J]. 地球化学,2010,39(2):159-170.
- [10] 朱东亚,孟庆强. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩中硅化作用成因

- [J]. 石油实验地质, 2010, 32(4): 358-361.
- Zhu Dongya, Meng Qingqiang. The genesis of silicification in the Lower Paleozoic carbonate in the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2010, 32(4): 358-361.
- [11] 李映涛, 叶宁, 袁晓宇, 等. 塔里木盆地顺南4井中硅化热液的地质与地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 934-944.
- Li Yingtao, Ye Ning, Yuan Xiaoyu, et al. Geological and geochemical characteristics of silicified hydrothermal fluids in Well Shunnan 4, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 934-944.
- [12] 洪才均, 康仁东, 韩俊, 等. 跃进地区奥陶系硅质岩地球化学特征及成因研究[J]. 新疆地质, 2018, 36(2): 239-245.
- Hong Caijun, Kang Rendong, Han Jun, et al. Geochemical characteristics and origin of the Ordovician siliceous rocks in Yuejin region[J]. Xinjiang Geology, 2018, 36(2): 239-245.
- [13] 袁雪君, 张智礼, 孟凡巍, 等. 塔里木盆地 YJ1X 井中奥陶统一间房组燧石结核中的有机壁微体化石[J]. 微体古生物学报, 2019, 36(1): 57-69.
- Yuan Xuejun, Zhang Zhili, Meng Fanwei, et al. Microbody organic-walled microfossils in nodular cherts from the Middle Ordovician Yijianfang Formation, Well YJ1X, Tarim Basin, China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2019, 36(1): 57-69.
- [14] 傅恒, 韩建辉, 孟万斌, 等. 塔里木盆地塔中北坡奥陶系碳酸盐岩岩溶储层的形成机理[J]. 天然气工业, 2017, 37(3): 25-36.
- Fu Heng, Han Jianhui, Meng Wanbin, et al. Forming mechanism of the Ordovician karst carbonate reservoirs on the northern slope of central Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(3): 25-36.
- [15] 陆朋朋, 罗平, 阳正熙, 等. 柯坪断隆寒武-奥陶系硅质岩特征及储层分析[J]. 新疆地质, 2012, 30(3): 329-334.
- Lu Pengpeng, Luo Ping, Yang Zhengxi, et al. The petrology characteristics, sedimentology and reservoir analysis of Cambrian-Ordovician siliceous rocks in Kalpin Fault-Uplift[J]. Xinjiang Geology, 2012, 30(3): 329-334.
- [16] 焦方正, 翟晓先. 海相碳酸盐岩非常规大油气田——塔河油田勘探研究与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 140-152.
- Jiao Fangzheng, Zhai Xiaoxian. A unconventional large oil and gas field of marine carbonate rock: Exploration research and practice of Tahe oil field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 140-152.
- [17] 刘存革, 刘树根, 李国蓉, 等. 塔里木盆地北部寒武系大型进积型台地—斜坡地震层序、演化与控制因素[J]. 地质学报, 2016, 90(4): 669-687.
- Liu Cunge, Liu Shugen, Li Guorong, et al. Seismic sequences, evolution and control factors of large Cambrian progradational platform-slope system in the northern Tarim Basin, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(4): 669-687.
- [18] 刘宝瑞. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1980: 192-322.
- Liu Baojun. Sedimentary petrology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1980: 192-322.
- [19] 曾允孚, 夏文杰. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986: 158-198.
- Zeng Yunfu, Xia Wenjie. Sedimentary petrology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986: 158-198.
- [20] 高阳, 刘春, 白晓佳, 等. 自生“加大”含铁白云石胶结物特征及对致密砂岩储层的影响——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组4+5段为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 1066-1073.
- Gao Yang, Liu Chun, Bai Xiaojia, et al. Cement characteristics of overgrown authigenic ferron dolomite and its impact on tight sandstone reservoirs qualities: Case study of the Chang 4 & 5 members of Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 1066-1073.
- [21] Maliva R G, Siever R. Diagenetic replacement controlled by force of crystallization[J]. Geology, 1988, 16(17): 688-691.
- [22] Maliva R G, Siever R. Nodular chert formation in carbonate rocks[J]. Journal of Geology, 1989, 97(4): 421-433.
- [23] Rogers P J, Longman W M. An introduction to chert reservoirs of North America[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(1): 1-5.
- [24] Watney L W, Guy J W, Byrnes P A. Characterization of the Mississippian Osage Chat in South-Central Kansas[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(1): 85-113.
- [25] Rogers M S. Deposition and diagenesis of Mississippian chat reservoirs, north-central Oklahoma[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(1): 115-129.
- [26] 柴方圆. 下扬子下古生界沉积相研究及有利区评价[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(2): 701-715.
- Chai Fangyuan. Study on Paleozoic sedimentary facies and favorable area evaluation in lower Yangtze basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(2): 701-715.
- [27] 贾振远, 李之琪. 碳酸盐岩沉积相和沉积环境[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989: 45-58.
- Jia Zhenyuan, Li Zhiqi. Carbonate sedimentary facies and sedimentary environment[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1989: 45-58.
- [28] 马永生, 梅冥相, 陈小兵, 等. 碳酸盐岩储层沉积学[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 70-101.
- Ma Yongsheng, Mei Mingxiang, Chen Xiaobing, et al. Carbonate reservoir sedimentology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 70-101.
- [29] 王清龙, 韩剑发, 李浩, 等. 塔里木盆地西北缘露头区中一下奥陶统碳酸盐岩层序结构、沉积演化及海平面变化[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 835-916.
- Wang Qinglong, Han Jianfa, Li Hao, et al. Carbonate sequence architecture, sedimentary evolution and sea level fluctuation of the Middle and Lower Ordovician on outcrops at the northwestern margin of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 835-916.
- [30] 刘红光, 刘波, 曹鉴华, 等. 塔里木盆地玉北地区中一下奥陶统储层发育特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(1): 107-118.
- Liu Hongguang, Liu Bo, Cao Jianhua, et al. Characteristics and controlling factors of Lower-Middle Ordovician reservoirs in Yubei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(1): 107-118.