

# 塔里木盆地古城台缘带寒武系丘滩体气藏形成特征

张君龙<sup>1,2</sup>, 冯子辉<sup>2</sup>, 李强<sup>2</sup>, 张斌<sup>2</sup>

(1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院 塔木察格勘探评价研究室, 黑龙江 大庆 163712)

**摘要:**塔里木盆地古城台缘带寒武系丘滩体风险勘探首次发现气层, 开拓了油气勘探的新领域。基于风险探井——城探1井钻探成果, 在岩心观察、岩石薄片鉴定、地球化学分析等综合研究的基础上, 结合测井和地震响应特征, 对古城台缘带发育的4期寒武系丘滩体的油气成藏条件进行了分析。结果表明: 寒武系丘滩体中天然气主要为古油藏的原油裂解气, 原油成藏时间在加里东中、晚期, 天然气成藏期在喜马拉雅期; 丘滩体储层发育, 主要由风化淋滤或有机酸的溶蚀作用形成, 一般核部主体部位储集条件优于翼部; 第一、二期丘滩体顶部发育直接盖层, 分布稳定, 储盖组合配置好, 具有独立成藏条件。第三、四期丘滩体顶部具有不整合暴露剥蚀特征, 直接盖层封盖能力较差, 需要在寒武系上部区域盖层配合下规模成藏; 古城台缘带断裂主要形成于寒武纪、中奥陶世、晚奥陶世3个时期, 后期构造活动弱, 有利于气藏保存。

**关键词:** 丘滩体; 成藏条件; 寒武系; 古城台缘带; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

## Evolution of Cambrian mound-beach gas reservoirs in Gucheng platform margin zone, Tarim Basin

ZHANG Junlong<sup>1,2</sup>, FENG Zihui<sup>2</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>, ZHANG Bin<sup>2</sup>

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Tamsag Exploration and Evaluation Department, Exploration and Development Research Institute, Daqing Oil Field Company, Daqing, Heilongjiang 163712, China)

**Abstract:** Gas has been discovered in the Cambrian mound-beach in the Gucheng platform margin zone of the Tarim Basin for the first time, opening up a new field of oil and gas exploration. The hydrocarbon accumulation conditions of four stages of Cambrian mound-beach in the Gucheng platform margin zone were analyzed based on core observation, cast thin section examination, geochemical analysis as well as logging and seismic data of exploration well CT 1. The results showed that the gas in the Cambrian mound-beach is mainly secondary gas from paleo-oil reservoirs. Oil accumulated during the middle and late Caledonian stage, which was cracked to gas during the Himalayan period. Mound-beach reservoirs formed due to weathering, leaching or organic acid dissolution, and the reservoir properties of the central part is better than that of the periphery. On the top of the first and second stages of the mound-beach, direct caprock developed and configured well with the reservoir, which is favorable for independent accumulations. In the third and fourth stages, the top of mound-beach was exposed and eroded, and the sealing ability of direct cap rock is poor. The Upper Cambrian regional cap rocks are required for a useful reservoir. Fractures in the Gucheng platform margin zone mainly formed in the Cambrian, middle Ordovician and late Ordovician periods. Later tectonic activities were weak, which is favorable for gas accumulation.

**Key words:** mound-beach; reservoir condition; Cambrian; Gucheng platform margin zone; Tarim Basin

勘探实践表明, 寒武系碳酸盐岩地层尽管地质时代老, 但如果油气源充足、储集条件优越、保存条件良好, 仍能够发现大规模的天然气资源<sup>[1-3]</sup>, 因此对寒武系碳酸盐岩油气藏的勘探研究已引起地质家的高度重视。我国中、下寒武统中发育的微生

物碳酸盐岩或丘滩体是重要的储集类型, 已有许多学者对其形成特征和储集特征开展了深入研究<sup>[4-7]</sup>。胡文瑄等<sup>[4]</sup>通过野外观察发现, 寒武系凝块石(礁)白云岩主要形成于潮下带水动力较强的沉积环境, 而叠层石白云岩则形成于潮坪—潮间水

动力相对稳定的沉积环境;宋金民等<sup>[6]</sup>通过野外剖面详测和室内分析认为,寒武系与微生物作用有关的岩石结构有球粒结构、纹层结构和微生物结构,微生物碳酸盐岩储层的发育受控于沉积古地貌、成岩作用和微生物结构。相对而言,对寒武系微生物碳酸盐岩或丘滩体储层油气藏的研究目前尚未见报道。

城探 1 井是针对寒武系丘滩体钻探的一口风险井,完钻井深 7 280 m,钻遇寒武系地层 739 m,其中丘滩体厚度 450 m。城探 1 井揭示出 3 个现象,一是丘滩体储层发育,丘滩体上部发育 I—II 类储层,测井孔隙度 6.9%~11.2%,但以含水为主;二是丘滩体发育有气层,丘滩体下部综合解释气层和差气层共 4 层 35.4 m,但储层物性以 II—III 类储层为主;三是丘滩体储层中不但有天然气,还有大量的残余沥青,尤其是丘滩体下部岩屑录井中,见到大量的沥青块,发育井段合计 347 m。上述现象表明,古城台缘带寒武系丘滩体具有较好的油气成藏条件,但油气藏的形成与演化也表现出复杂性。

本文基于城探 1 井钻探成果,通过地质、地球物理和地球化学等综合分析,研究了古城台缘带寒武系丘滩体油气成藏条件,以期为开拓碳酸盐岩勘探新领域和明确勘探方向提供参考。

### 1 区域地质概况

塔里木盆地寒武—奥陶纪时期发育碳酸盐岩台地。寒武系台缘带广泛发育的多期叠置的丘滩体一直是地质家们梦想突破的重要领域<sup>[8-9]</sup>。古城台缘带位于塔里木盆地东部古城低凸起东侧(图 1),面积约 2 500 km<sup>2</sup>,发育地层有寒武系、奥陶系、石炭系、三叠系、白垩系和古近系等,主要勘探目的是中、下奥陶统和寒武系碳酸盐岩。在构造上古城台缘带总体呈西北倾的大型鼻状构造,被北东向断裂切割成一系列断块和断鼻。在沉积上古

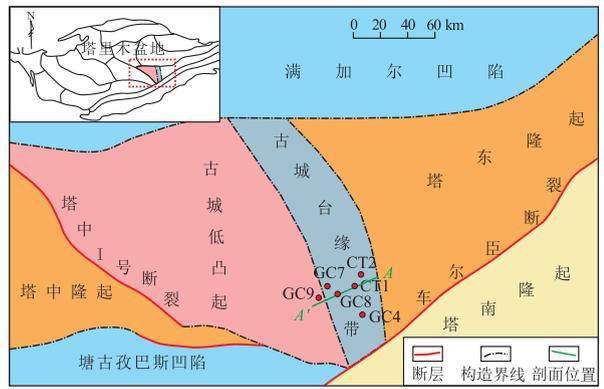


图 1 塔里木盆地古城台缘带位置

Fig.1 Location of Gucheng platform margin zone, Tarim Basin

古城台缘带碳酸盐岩经历了局限台地、半局限台地和开阔台地的沉积演化过程<sup>[10-11]</sup>,沉积厚度大,一般超过 3 km。古城台缘带是继承性古隆起,东邻满加尔生油凹陷,是油气侧向运移的有利指向区,油源条件优越<sup>[12]</sup>。目前在中、下奥陶统油气勘探已实现突破,部分单井获日产超百万方的天然气。

三维地震揭示,古城台缘带寒武系发育 4 期丘滩体,其中城探 1 井揭示了第三期丘滩体的核部和第二期丘滩体的翼部(图 2),平面上各期丘滩体呈近南北向展布。第一期丘滩体厚度 225~650 m,平均 420 m,宽度 6.9~10.5 km,平均 8.4 km;第二期丘滩体厚度 125~525 m,平均 375 m,宽度 7.5~11.7 km,平均 9.4 km;第三期丘滩体厚度 125~500 m,平均 390 m,宽度 7.1~11.2 km,平均 9.1 km;第四期丘滩体厚度 125~550 m,平均 360 m,宽度 5.2~8.4 km,平均 8.3 km。古城台缘带寒武系 4 期丘滩体横向前积叠置,叠合面积 1 800 km<sup>2</sup>,除第一期丘滩体外,埋深一般都小于 7 500 m,为碳酸盐岩油气藏勘探提供了广阔的领域。

### 2 天然气来源分析

古城台缘带城探 1 井在寒武系丘滩体储层中

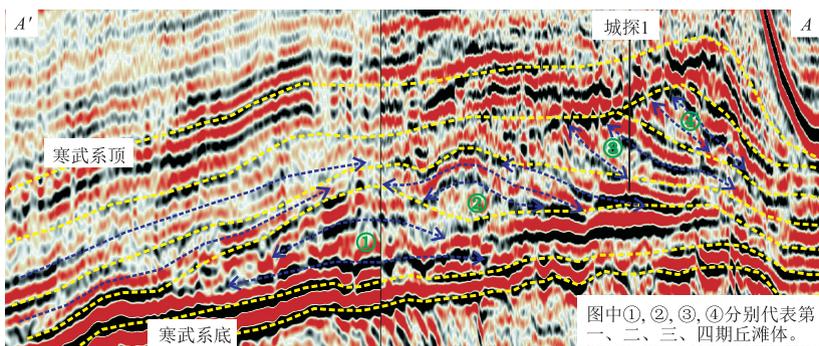


图 2 塔里木盆地古城台缘带丘滩体地震响应特征

Fig.2 Seismic response characteristics of mound-beach in Gucheng platform margin zone, Tarim Basin

见到气层,气组分以甲烷为主,含少量重烃类气体,基本不含硫化氢。寒武系丘滩体储层气体组成与奥陶系白云岩储层见到的天然气特征基本相同。对古城地区天然气的成因分析表明,天然气成因基本为原油裂解气<sup>[13]</sup>。

城探1井在岩屑录井过程中,于6 935~7 280 m井段见较多沥青块,用火点可燃烧。沥青透射光薄片分析发现具有球晶状结构,显示处于焦沥青演化阶段,反映原油裂解后残留的结果。沥青有机地球化学分析,TOC含量为76.82%;热解色谱分析, $S_1$ 为0.13 mg/g, $S_2$ 为0.44 mg/g,H/C原子比为0.4,沥青等效镜质体反射率 $R_o = 2.43\% \sim 2.51\%$ ,展示沥青目前仍具有进一步裂解生气的潜力<sup>[14]</sup>。推测古城台缘带发育古油藏,在后期的演化过程中,古油藏中原油裂解成气,形成现今的天然气藏。

方解石和石英充填物中见2期包裹体,一期是石英脉中的油气包裹体,见浅绿色荧光,均一温度为150~170℃;另一期为气体包裹体,镜下以暗色为主,均一温度160~180℃,反映了2期成藏过程,结合地区沉积埋藏史和热演化史分析,早期为晚奥陶世成油期,晚期为喜马拉雅期成气期。

### 3 丘滩体储集条件分析

城探1井揭示了第二期丘滩体前翼,岩性以深

灰、灰黑色菌藻白云岩、残余砂屑球粒白云岩为主,残余颗粒粒度较细(图3a-d),碳同位素以正偏为主,范围0.043‰~1.4‰,平均0.634‰,去铀GR值较高,范围1.48~22.80 API,平均6.16 API(图4),反映水体相对较深、能量偏弱的沉积特征<sup>[15-17]</sup>。第二期丘滩体钻遇孔隙型储层39.2 m/5层,单层厚度3.8~15.2 m,储层岩性以颗粒云岩为主,铸体薄片上反映储集空间以白云岩晶间孔、晶间溶孔基质孔隙为主(图5a,b),成像测井影像上发育裂缝,CT扫描反映这种裂缝孔隙型储层基质孔隙发育,基质孔隙度为1.02%,但连通性好,连通体积百分比达76.6%,岩心孔隙度在0.8%~2.1%,平均1.3%,渗透率为 $0.006 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,以II—III类储层为主,反映丘滩体翼部储层物性相对偏差的特征。结合孔隙空间类型及第二期丘滩体内普遍发育大量沥青的特征推断,这类储层孔隙成因主要为白云石的云化作用及有机酸溶蚀作用的结果<sup>[5,9,18-19]</sup>。

城探1井钻遇第三期丘滩体的核部,上部岩性以残余鲕粒、砂屑白云岩为主,下部发育含砂屑球粒白云岩,残余颗粒粒度相对较粗(图3e-h),碳同位素整体表现为负偏,-1.05‰~0.29‰,平均-0.226‰,去铀GR值低平,平均2.94 API(图4),反映水体相对较浅、能量较强的沉积特征<sup>[20-22]</sup>。第三期丘滩体钻遇缝孔洞型储层97.4m/11层,单

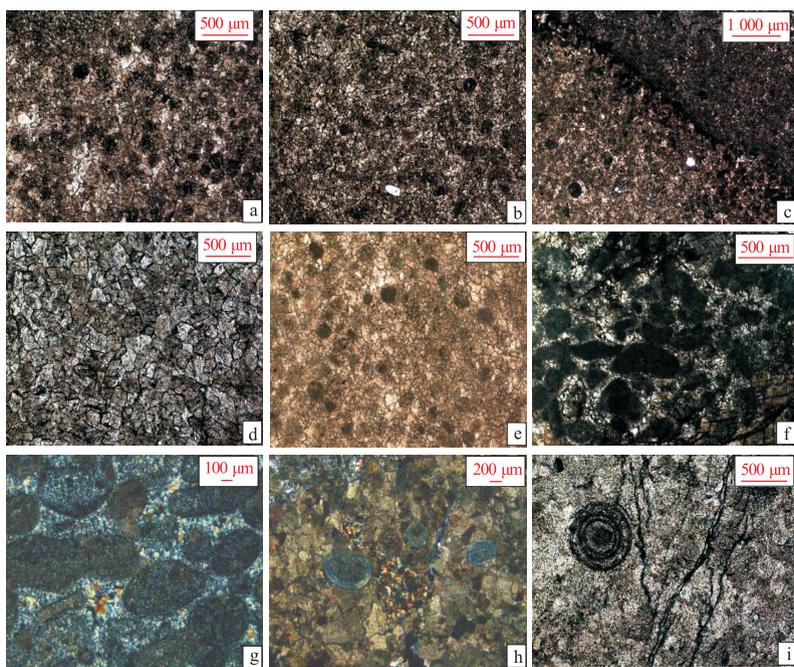


图3 塔里木盆地古城台缘带城探1井岩石结构类型

a.7 257 m,残余砂屑粉晶云岩;b.7 201.0 m,藻黏结砂屑粉晶云岩;c.7 142.7 m,藻纹层粉晶云岩;d.7 099.4 m,粉晶细晶云岩;e.7 037.5 m,砂屑球粒粉晶云岩;f.7 006 m,砂屑球粒粉晶云岩;g.6 936.02 m,砂屑细晶云岩;h.6 888.38 m,砂屑鲕粒细晶云岩;i.6 891.18 m,残余鲕粒细晶云岩

Fig.3 Rock structure types of well CT1, Gucheng platform margin zone, Tarim Basin

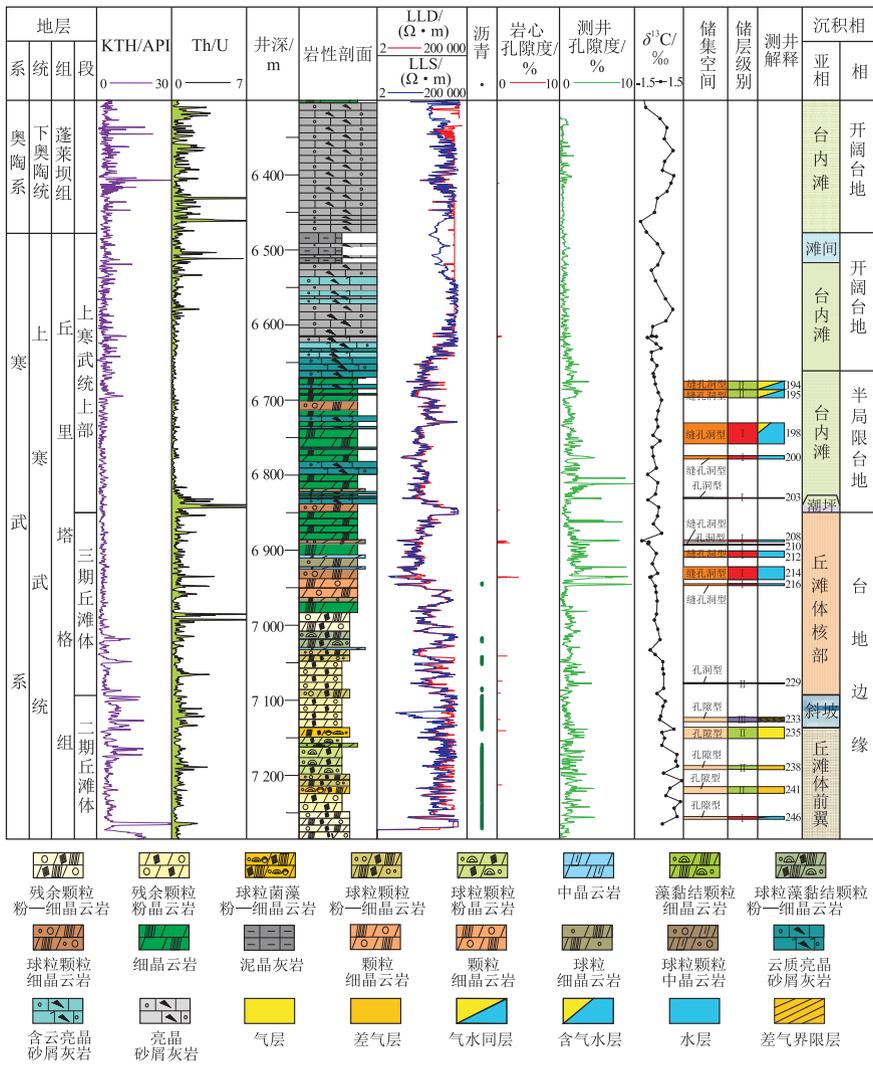


图 4 塔里木盆地古城台缘带城探 1 井寒武系综合柱状图

Fig.4 Synthetic stratigraphic column of Cambrian, well CT1, Gucheng platform margin zone, Tarim Basin

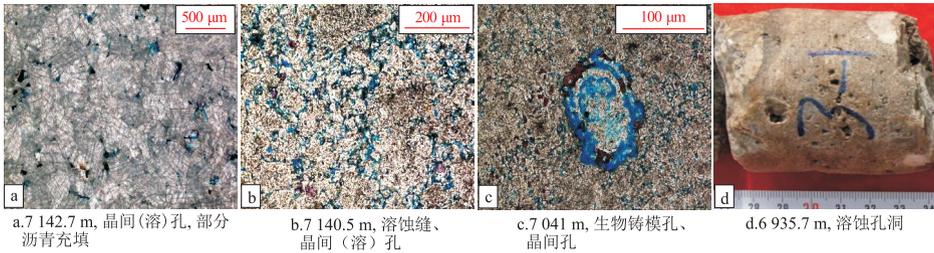


图 5 塔里木盆地古城台缘带城探 1 井储集空间类型

Fig.5 Reservoir porosity types of well CT1, Gucheng platform margin zone, Tarim Basin

层厚度 1.0~17.2 m, 储层岩性以残余鲕粒白云岩、砂屑白云岩为主, 岩心上可见溶塌角砾岩砾间中粗晶白云石充填的残余孔洞, 镜下发育生物铸膜溶蚀孔(图 5c, d), 岩石大薄片图像具有明显的渗流粉砂充填的示底构造, 成像测井上裂缝及溶蚀孔洞多, 孔隙胶结物成分分析显示, Sr/Ba 值为 0.65, 表现出大气淡水表生岩溶作用的特征<sup>[7,9,18]</sup>, 依据储层的发育情况推断大气淡水影响深度范围在 120~

150 m。第三期丘滩体缝孔洞型储层物性较好, 岩心孔隙度 1.2%~5.1%, 平均 2.2%, 测井孔隙度 3.8%~11.2%, 平均 6.8%, 为 I—II 类储层。

钻井揭示的储层特征表明, 丘滩体不同部位储层发育情况具有差异性。丘滩体建隆主体部位水体较浅, 顶部容易发生表生岩溶作用改造形成物性较好的缝孔洞型储层。丘滩体翼部沉积水体相对较深, 表生岩溶作用弱, 有机质含量相对高, 在早期

白云石化作用的基础上发生有机酸溶蚀作用,形成较均质的基质孔隙型储层。野外地质露头剖面分析结果也表明丘滩体建隆主体部位的上部储层较发育,优于翼部的储层特征<sup>[4-6]</sup>。

### 4 盖层条件分析

城探1井揭示各期丘滩体顶部的岩性及形成条件有明显差异,从而造成丘滩体直接盖层发育的不同。第二期丘滩体顶部发育约40 m厚的灰黑色、深灰色粉细晶白云岩,岩心孔隙度为0.8%,渗透率为 $0.003 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,电阻率值一般大于 $26\ 000 \Omega \cdot \text{m}$ ,去铀GR高值,一般在8 API以上,表现出泥质含量高的特征(图4)。成像测井图像呈纹层状结构,反映水体较深的低能斜坡—陆棚沉积环境。第二期丘滩体无铀伽马自下而上由齿状低平值向尖峰状高值变化,表现出海平面逐渐上升、水体加深的特征<sup>[15-17]</sup>,在 seismic 剖面上(图2),第二期顶面为强振幅连续的反射同相轴,在区内可连续追踪、分布稳定,强振幅反射界面所构成的丘滩体包络形态完整。在丘滩体朝向陆地一侧,上覆地层有向其顶面超覆的特征,向盆地方向上覆地层地震同相轴逐渐下超在其之上,呈现下超密集段特征。由于海侵形成的海泛密集段稳定发育,岩性致密,对丘滩体具有较好的封盖能力,可作为丘滩体的直接盖层。城探1井第二期丘滩体见到气层就是其盖层有效的直接证据。第一期丘滩体顶面与第二期丘滩体具有相似的密集段、强振幅连续的地震反射特征,推

测第一期顶面也发育直接盖层。

城探1井第三期丘滩体顶部发育约13 m厚的灰白色残余砂屑粉细晶白云岩(图3i),岩心孔隙度为0.6%,渗透率为 $0.005 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,电阻率值为 $32\ 000 \Omega \cdot \text{m}$ ,去铀GR值低平,一般在2.1 API,为泥质含量较低的特征。第三期丘滩体碳同位素数据具有自下而上数值由正偏逐渐负偏的变换特征,无铀伽马自下而上由尖峰状高值向低平值变化,反映海平面下降过程<sup>[15-17]</sup>,顶部自然伽马能谱测井钍铀比大于7,表现出风化残积层特征<sup>[19-20]</sup>,在 seismic 剖面上(图2),第三期丘滩体顶面为明显的削截特征,地化、测井及地震资料综合分析表明第三期丘滩体在海退背景下形成,顶面遭受暴露剥蚀,发育风化残积层,厚度薄,横向分布不稳定,粉细晶白云岩封盖能力较差,丘滩体成藏直接盖层条件差,导致这期丘滩体优质储层主要为含水层或含气水层。第三、四期丘滩体顶面地震同相轴均具有削截特征,推测这类丘滩体成藏需要配合有效的区域盖层。

### 5 圈闭与保存条件分析

各期丘滩体顶面构造圈闭沿台缘丘滩体沉积呈南北条带式展布(图6),丘滩体建隆主体部位与构造圈闭高点大体相当。

城探1井井震标定,储层一般具有强振幅、低频属性以及低阻抗特征。利用振幅属性和波阻抗反演对丘滩体储层进行预测,丘滩体整体上储层发育,储层厚度一般为80~180m;建隆主体部位盖层

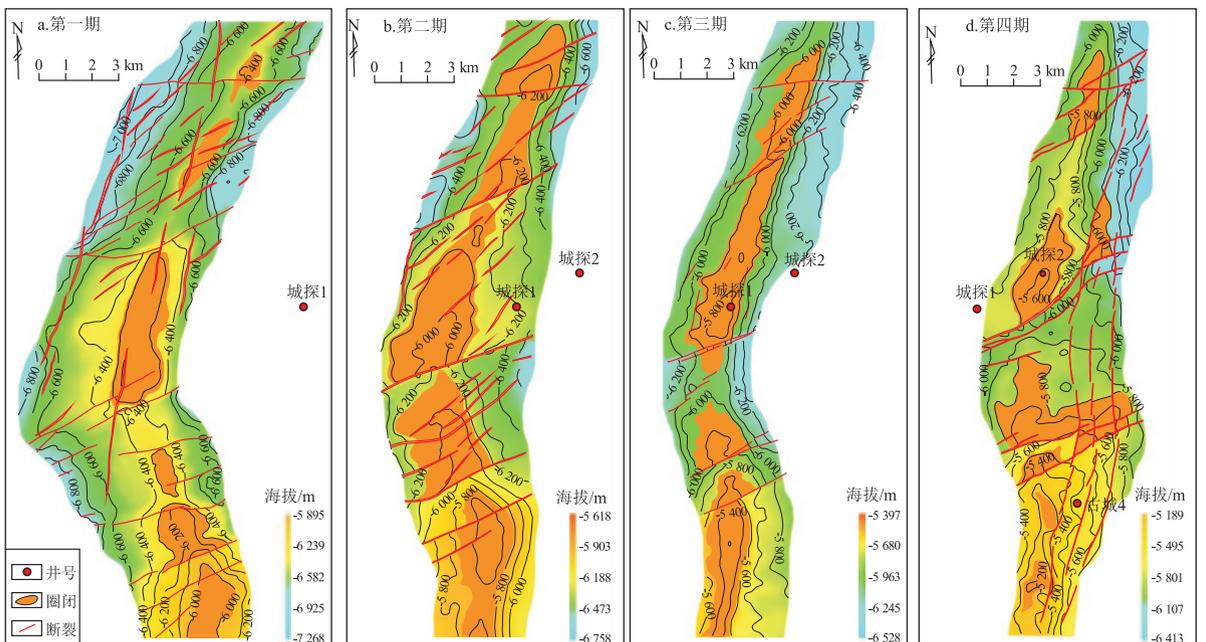


图6 塔里木盆地古城地区4期丘滩体顶面构造

Fig.6 Top surface structures of four stages of mound-beach in Gucheng platform margin zone, Tarim Basin

预测结果显示,第一、二期丘滩体直接盖层一般厚度在30~80 m,第三、四期直接盖层一般厚度在20~30 m。综合构造、储层及盖层的发育情况表明,第一、二期丘滩体构造圈闭发育,圈闭内发育储层;丘滩体顶部直接盖层条件好,单个丘滩体可能整体含气、独立成藏。第三、四期丘滩体构造圈闭发育,储层条件较好,但直接盖层条件较差,需要其他区域盖层遮挡成藏,例如以寒武系上部、奥陶系蓬莱坝组下部致密灰岩作盖层。

古城台缘带构造演化主要经历早期伸展(加里东期)、中期抬升、剥蚀(海西—印支期)、后期沉降(燕山—喜马拉雅期)3个演化阶段,晚期构造活动弱,以埋藏作用为主,有利于油气藏的保存<sup>[23-24]</sup>。区内发育3期断裂,第一期发育于寒武纪,以张性正断层为主,数量多,规模小;第二期发育于早中奥陶世,以张扭性走滑断裂为主,规模大,分布广,以北东向为主;第三期发育于晚奥陶世—泥盆纪,以压扭性走滑断裂为主,与南部阿尔金山车尔臣断裂活动有关,持续时间长,是早、中奥陶世继承性发育的断裂。第一和第二期断裂形成时间早于第一期成藏时间,在全区发育,为油气成藏运移提供了通道。第三期断裂形成于第一期成藏之后,对古油藏有破坏作用,由于断裂主要发育在研究区南部,对丘滩体成藏的影响从南向北有减弱趋势。

## 6 结论

(1)古城台缘带寒武系丘滩体气藏为原油裂解气。丘滩体中揭示的大量沥青证实,古城台缘带存在古油藏,古油藏裂解气为气藏形成奠定了物质基础。古油藏形成时间大约在加里东期,天然气成藏时间大约在喜马拉雅期。

(2)古城台缘带寒武系丘滩体主体部位水体浅,可以形成大气水表生岩溶缝孔洞型优质储层;丘滩体翼部水体相对较深,表生岩溶作用弱,储层以白云石化作用及有机酸溶蚀作用下形成的晶间孔、晶间溶孔为主,储层物性较差,但基质孔隙发育,连通性好。

(3)古城台缘带寒武系第一、二期丘滩体在海侵背景下形成,顶部发育海泛密集稳定分布的粉细晶白云岩,可作为丘滩体的直接盖层;第三、四期丘滩体在海退背景下形成,顶面遭受风化剥蚀,不利于形成稳定有效的直接盖层。

(4)古城台缘带晚期构造活动弱,断裂对油气藏的破坏作用小。寒武系第一、二期丘滩体岩溶型

储层发育,顶部具备稳定盖层条件,储盖组合配置好,丘滩体主体部位构造圈闭有效性落实,可独立成藏。第三、四期丘滩体优质储层发育,以奥陶系蓬莱坝组下部灰岩作为区域盖层,在寒武系顶部有效构造圈闭内有望规模成藏。

### 参考文献:

- [1] 谷志东,殷积峰,袁苗,等.四川盆地东部深层盐下震旦系—寒武系天然气成藏条件与勘探方向[J].石油勘探与开发,2015,42(2):137-149.  
GU Zhidong, YIN Jifeng, YUAN Miao, et al. Accumulation conditions and exploration directions of natural gas in deep subsalt Sinian-Cambrian system in the eastern Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2):137-149.
- [2] 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.  
ZOU Caineng, DU Jinhui, XU Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3):278-293.
- [3] 漆立新,塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J].石油与天然气地质,2014,35(6):771-779.  
QI Lixin. Exploration practice and prospects of giant carbonate field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6):771-779.
- [4] 胡文瑄,朱井泉,王小林,等.塔里木盆地柯坪地区寒武系微生物白云岩特征、成因及意义[J].石油与天然气地质,2014,35(6):860-869.  
HU Wenxuan, ZHU Jingquan, WANG Xiaolin, et al. Characteristics, origin and geological implications of the Cambrian microbial dolomite in Keping area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6):860-869.
- [5] 李斌,彭军,杨素举,等.塔里木盆地巴楚地区寒武系肖尔布拉克组储层特征及成因模式[J].石油实验地质,2017,39(6):797-804.  
LI Bin, PENG Jun, YANG Sujun, et al. Genetic model and characteristics of the Cambrian Shorebulake reservoir in Bachu area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(6):797-804.
- [6] 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.  
SONG Jinmin, LUO Ping, YANG Shisheng, et al. Reservoirs of Lower Cambrian microbial carbonates, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4):404-413.
- [7] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式:以四川普光气田为例[J].地质学报,2010,84(8):1087-1094.  
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Formation mechanism of deep-buried carbonate reservoir and its model of three-element controlling reservoir: a case study from the Puguang Oilfield in Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 2010,

- 84(8):1087-1094.
- [8] 云露,翟晓先.塔里木盆地塔深1井寒武系储层与成藏特征探讨[J].石油与天然气地质,2008,29(6):726-732.  
YUN Lu, ZHAI Xiaoxian. Discussion on characteristics of the Cambrian reservoirs and hydrocarbon accumulation in well Tashen-1, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 726-732.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 任延广,张君龙,齐景顺,等.塔东地区寒武—奥陶系碳酸盐岩沉积特征及演化规律[J].大庆石油地质与开发,2014,33(5):103-110.  
REN Yanguang, ZHANG Junlong, QI Jingshun, et al. Sedimentary characteristics and evolution laws of Cambrian-Ordovician carbonate rocks in Tadong region [J]. Petroleum Geology and Oil-field Development in Daqing, 2014, 33(5): 103-110.
- [12] 高志前,樊太亮,李岩,等.塔里木盆地寒武系—奥陶系烃源岩发育模式及分布规律[J].现代地质,2006,20(1):69-76.  
GAO Zhiqian, FAN Tailiang, LI Yan, et al. Development pattern and distribution rule of source rock of Cambrian-Ordovician in Tarim Basin [J]. Geoscience, 2006, 20(1): 69-76.
- [13] 王铁冠,宋到福,李美俊,等.塔里木盆地顺南—古城地区奥陶系鹰山组天然气气源与深层天然气勘探前景[J].石油与天然气地质,2014,35(6):753-762.  
WANG Tieguan, SONG Daofu, LI Meijun, et al. Natural gas source and deep gas exploration potential of the Ordovician Yingshan Formation in the Shunnan-Gucheng region, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 753-762.
- [14] 赵文智,王兆云,王红军,等.再论有机质“接力成气”的内涵与意义[J].石油勘探与开发,2011,38(2):129-135.  
ZHAO Wenzhi, WANG Zhaoyun, WANG Hongjun, et al. Further discussion on the connotation and significance of the natural gas relaying generation model from organic materials [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 129-135.
- [15] KAUFMAN A J, KNOLL A H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications [J]. Precambrian Research, 1995, 73(1/4):27-49.
- [16] HOFFMAN A, GRUSZCZYNSKI M, MALKOWSKI K. On the inter-relationship between temporal trends in  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , and  $\delta^{34}\text{S}$  in the world ocean [J]. The Journal Geology, 1991, 99(3): 355-370.
- [17] 邢舟,王军,王志强,等.自然伽马能谱测井在碳酸盐岩储层的地质应用[J].石油天然气学报,2005,27(6):743-745.  
XING Zhou, WANG Jun, WANG Zhiqiang, et al. Natural gamma ray spectrometry logging geological application in carbonate reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(6): 743-745.
- [18] 王永炜,李荣西,高胜利,等.渤海湾盆地黄骅坳陷湖相碳酸盐岩微量元素特征及沉积环境[J].石油实验地质,2017,39(6):849-857.  
WANG Yongwei, LI Rongxi, GAO Shengli, et al. Trace element characteristics and sedimentary environment of lacustrine carbonate rocks in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(6): 849-857.
- [19] 朱光有,张水昌,梁英波,等.TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造:四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J].岩石学报,2006,22(8):2182-2194.  
ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, LIANG Yingbo, et al. Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: an important type of deep-buried high-quality carbonate reservoirs in Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2182-2194.
- [20] RUFFELL A, WORDEN R. Palaeoclimate analysis using spectral gamma-ray data from the Aptian (Cretaceous) of southern England and southern France [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 155(3/4): 265-283.
- [21] 刘宏,谭秀成,周彦,等.颗粒碳酸盐岩测井相及其对滩相储层的指示意义[J].天然气地球科学,2007,18(4):527-530.  
LIU Hong, TAN Xiucheng, ZHOU Yan, et al. Logging facies of granular carbonate rocks and its implication on reservoir evaluation [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 527-530.
- [22] 张君龙.碳酸盐岩层序沉积演化及海平面的控制作用:以塔里木盆地古城地区奥陶系为例[J].天然气工业,2017,37(1):46-53.  
ZHANG Junlong. Carbonate sequence sedimentary evolution and control of sea level: a case study of Ordovician in the Gucheng area, Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 46-53.
- [23] 何登发,贾承造,李德生,等.塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J].石油与天然气地质,2005,26(1):64-77.  
HE Dengfa, JIA Chengzao, LI Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 64-77.
- [24] 张光亚,赵文智,王红军,等.塔里木盆地多旋回构造演化与复合含油气系统[J].石油与天然气地质,2007,28(5):653-663.  
ZHANG Guangya, ZHAO Wenzhi, WANG Hongjun, et al. Multi-cycle tectonic evolution and composite petroleum systems in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(5): 653-663.