

引用格式:朱永进,郑剑锋,刘玲利,等.塔里木盆地寒武统吾松格尔组沉积期岩相古地理与勘探意义[J].天然气地球科学,2022,33(1):1-12.

ZHU Yongjin, ZHENG Jianfeng, LIU Lingli, et al. Lithofacies paleogeography and exploration significance of Lower Cambrian Wusonger Formation depositional stage, Tarim Basin, NW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(1): 1-12.

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2021.05.009

## 塔里木盆地寒武统吾松格尔组沉积期 岩相古地理与勘探意义

朱永进<sup>1,2,3</sup>, 郑剑锋<sup>1,2</sup>, 刘玲利<sup>1</sup>, 冯光<sup>4</sup>, 吴凤<sup>5</sup>, 闫磊<sup>3</sup>, 张天付<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023;

2. 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江 杭州 310023;

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

4. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000;

5. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710065)

**摘要:**塔里木盆地柯探1井和轮探1井相继在下寒武统吾松格尔组获得高产工业油气流,突破了整体富泥的传统层系评价定位,但目前对吾松格尔组岩相古地理研究几乎为空白,制约了有利储集相带评价与预测。综合利用阿克苏地区露头资料、录井岩屑、C/O同位素曲线、测井及地震资料,分析了塔里木盆地吾松格尔组沉积期古地理格局、沉积环境及储层分布。结果表明:①吾松格尔组沉积期沉积充填序列及地层分布受塔南、乌恰及温宿三大台内古隆和边缘凹陷控制。古隆起区吾松格尔组超覆沉积,厚度薄,发育混积潮坪、弱镶边台地相;边缘凹陷地层齐全、厚度大,发育深水盆地相和局限潟湖相。②吾松格尔组沉积序列总体表现为一个完整的“海侵—海退”沉积旋回,轮南至古城地区超覆发育塔里木盆地寒武系第一套弱镶边型台地边缘,联合控制沉积期混积潮坪—局限台地的发育。③吾松格尔组发育台缘丘滩、礁后滩及潮上—潮间带薄层台内滩3类白云岩储集层,分布面积大。其中,主要发育于轮南—古城地区的台缘丘滩和礁后滩白云岩储层品质较高,预测面积达12 070 km<sup>2</sup>。以储集层预测为基础,评价认为轮南—古城地区与上覆膏盐岩盖层构成新的一套有利储盖组合且轮探1井已获突破,是下一步重点探索的有利区带。

**关键词:**古隆起;混积潮坪;弱镶边台地;吾松格尔组;下寒武统;塔里木盆地

**中图分类号:** TE121.3<sup>+</sup>4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-1926(2022)01-0001-12

### 0 引言

塔里木盆地寒武系盐下白云岩领域发育规模优质烃源岩和储集层且配置关系良好,使其已成为该盆地深层—超深层油气勘探的重要战略接替领域<sup>[1]</sup>。自1995年巴楚隆起和4井首次揭开该套成藏组合至2013年塔中隆起中深1C井获重要油气勘探苗头期间<sup>[2-3]</sup>,下寒武统肖尔布拉克组一直被视为寒

武系盐下白云岩领域的主力储集层<sup>[4-6]</sup>,而紧邻中寒武统膏盐岩盖层的下寒武统吾松格尔组却一直未受到关注和重视,甚至一度被定位为泥质碳酸盐岩盖层进行评价[图1(c)]。2019—2020年北京京能油气资源开发有限公司(简称“京能公司”)的柯探1井和中国石油的轮探1井<sup>[7]</sup>相继在吾松格尔组获得高产工业油气流,展现出层系勘探的重要价值与前景,有望成为寒武系盐下白云岩领域风险勘探新层

收稿日期:2021-04-25;修回日期:2021-06-09.

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“海相碳酸盐岩成藏理论与勘探技术研究”(编号:2021DJ05)资助.

作者简介:朱永进(1984-),男,江苏徐州人,高级工程师,博士,主要从事碳酸盐岩岩相古地理与综合评价研究.

E-mail: zhuyj\_hz@petrochina.com.cn.

通信作者:刘玲利(1984-),女,湖北天门人,工程师,硕士,主要从事地球物理储层预测与综合评价研究. E-mail: liull\_hz@petrochina.com.cn.

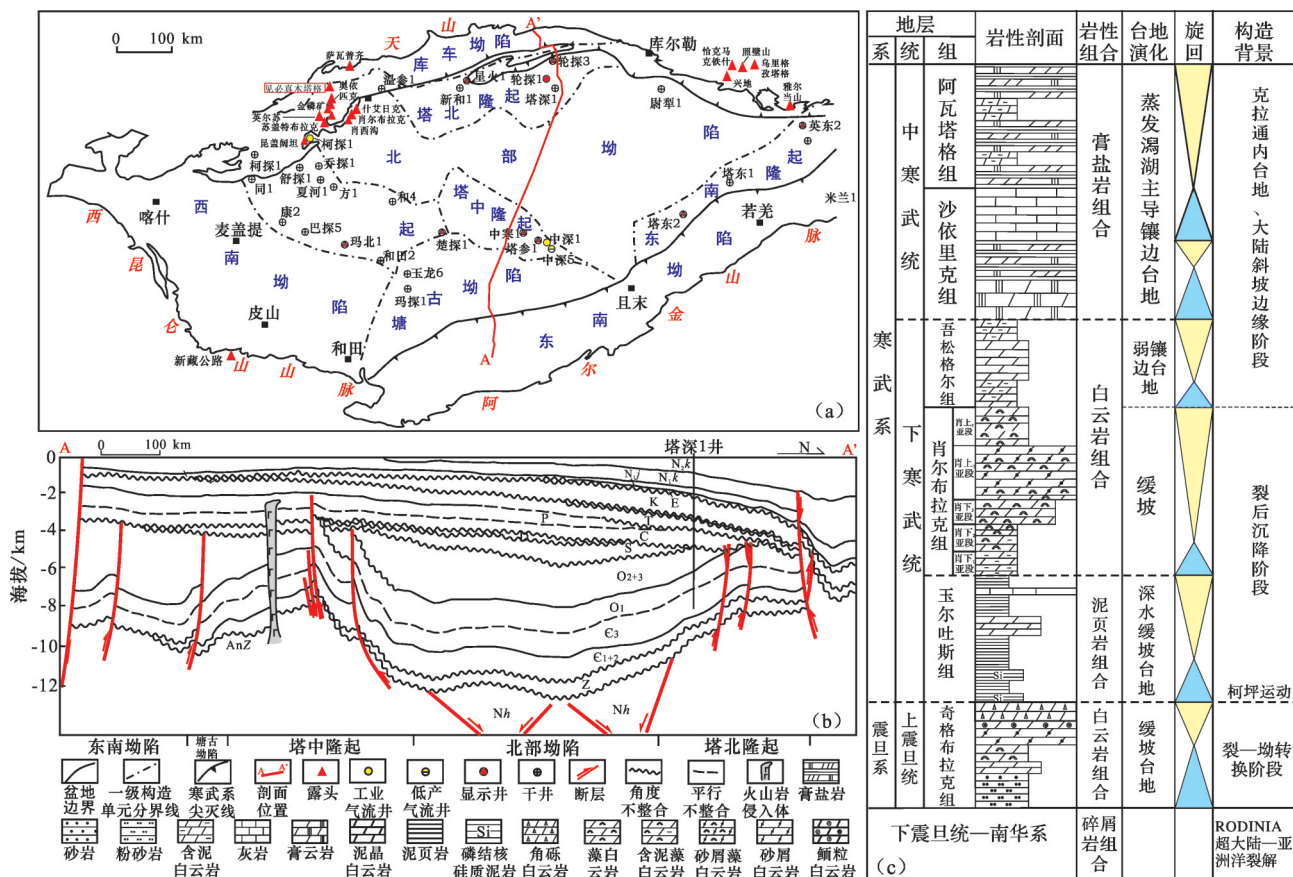


图1 塔里木盆地构造分区简图(a)、南北向构造—地层结构剖面(b)及地层综合柱状图(c)

Fig.1 Schematic diagram of tectonic units(a), tectonic-stratigraphic section from south to north(b), and stratigraphic synthesis columnar section(c) of the Tarim Basin

系。柯探1井位于塔里木盆地西北缘柯坪断隆构造区,2019年9月测试获日产气  $28 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; 轮探1井位于塔北地区轮南低凸起,2020年1月测试获日产油  $134 \text{ m}^3$ , 日产气  $45\,917 \text{ m}^3$  [7]。

截至目前,关于塔里木盆地吾松格尔组的研究主要集中在基于西北缘阿克苏地区露头资料,在岩石类型及组合、储集层表征等方面取得了一定进展 [8-9]。白莹等 [8] 将混积岩的概念引入中下寒武统沙依里克组—吾松格尔组,提出阿克苏地区发育碳酸盐岩缓坡、蒸发混积局限台地和蒸发局限台地。张天付等 [9] 提出吾松格尔组以发育潮坪相为主,潮间带薄—中层浅滩相白云岩具备一定储集能力,并尝试建立了储集层发育模型。关于吾松格尔组沉积期岩相古地理尚未见报道,仅在下寒武统整体研究中提及早寒武世晚期可能发育碳酸盐岩缓坡、平顶缓坡或弱镶边台地等 [10-11]。以岩相古地理为重点的油气地质条件研究几乎为空白,直接制约了有利储集相带评价及勘探有利区优选,成为亟待解决的关键基础地质问题。

本文研究利用阿克苏地区少量露头剖面、15口井C/O同位素数据、最新拼接的42条地震大剖面和2~5 m采样间隔的高精度岩屑校正钻井剖面等资料,开展吾松格尔组碳同位素地层对比、构造古地理背景及沉积相等基础研究,编制吾松格尔组岩相古地理图,同时开展储集层评价与预测分析,为该新层系整体评价及勘探区带优选提供地质依据。

## 1 吾松格尔组地层特征与展布

塔里木盆地下寒武统吾松格尔组分布广泛,不同地区分层有不同的组名。轮南—古城以西地区(现称“塔西台地”)将其称之为吾松格尔组,塔东地区则与其他下寒武统地层共称为西大山—西山布拉克组。

### 1.1 地层特征

吾松格尔组是1973年由新疆区队命名,命名剖面为苏盖特布拉克,岩性以浅灰色、灰色、紫红色薄层粉晶白云岩、瘤状白云岩、薄层砂屑白云岩等为主,常夹有粉砂岩,上部产三叶虫化石碎片,下部

产 *Paokannia*、*Redlichia* 等及微古植物化石,与上覆中寒武统沙依里克组及下伏下寒武统肖尔布拉克组均为假整合接触。截至目前,已有 22 口钻井与柯坪地区 9 个露头点揭示出吾松格尔组地层特征,除塔南古隆起、乌恰古隆起核心区缺失外,其余地区均有沉积。岩性横向变化较大,在柯坪地区、巴楚隆起等地区主要为(浅)灰色薄层泥粉晶白云岩、瘤状白云岩夹薄层砂屑白云岩,陆源碎屑含量较高;塔中地区以灰色泥岩、藻白云岩及含粉砂粉晶白云岩为主;塔北地区新和 1 井区为(黑)褐灰色含泥灰岩、灰岩;至轮南低凸起地区则为藻屑白云岩、(含泥)灰质白云岩。与下寒武统沉积时代相当的地质层,在塔东地区称之为西大山—西山布拉克组,内部暂未进一步划分层组,整体为一套深灰色、灰色

泥岩夹泥质灰岩沉积。

## 1.2 地层分布

尽管对下寒武统吾松格尔组整体特征已有较好掌握,但已有公开报道对其顶底界限尚存在明显差异<sup>[8-9]</sup>,尤其是吾松格尔组和上覆沙依里克组之间界面分歧最大。利用全盆地 15 口系统测试碳氧同位素数据钻井并进行地层对比[图 2(b)],结合轮南地区台地边缘地震同相轴终止反射特征,厘定了吾松格尔组顶底界面。对比结果表明,吾松格尔组顶和底普遍发育 ROECE (Redlichid-Oleneliid Extinction Carbon isotope Excursion) 和 AECE (Archaeocyathid Extinction Carbon isotope Excursion) 2 个碳同位素负异常<sup>[12-13]</sup>。其中,ROECE 代表了莱德利基虫类 (*Redlichid*) 和小油栉虫类 (*Oleneliid*) 集体灭绝,

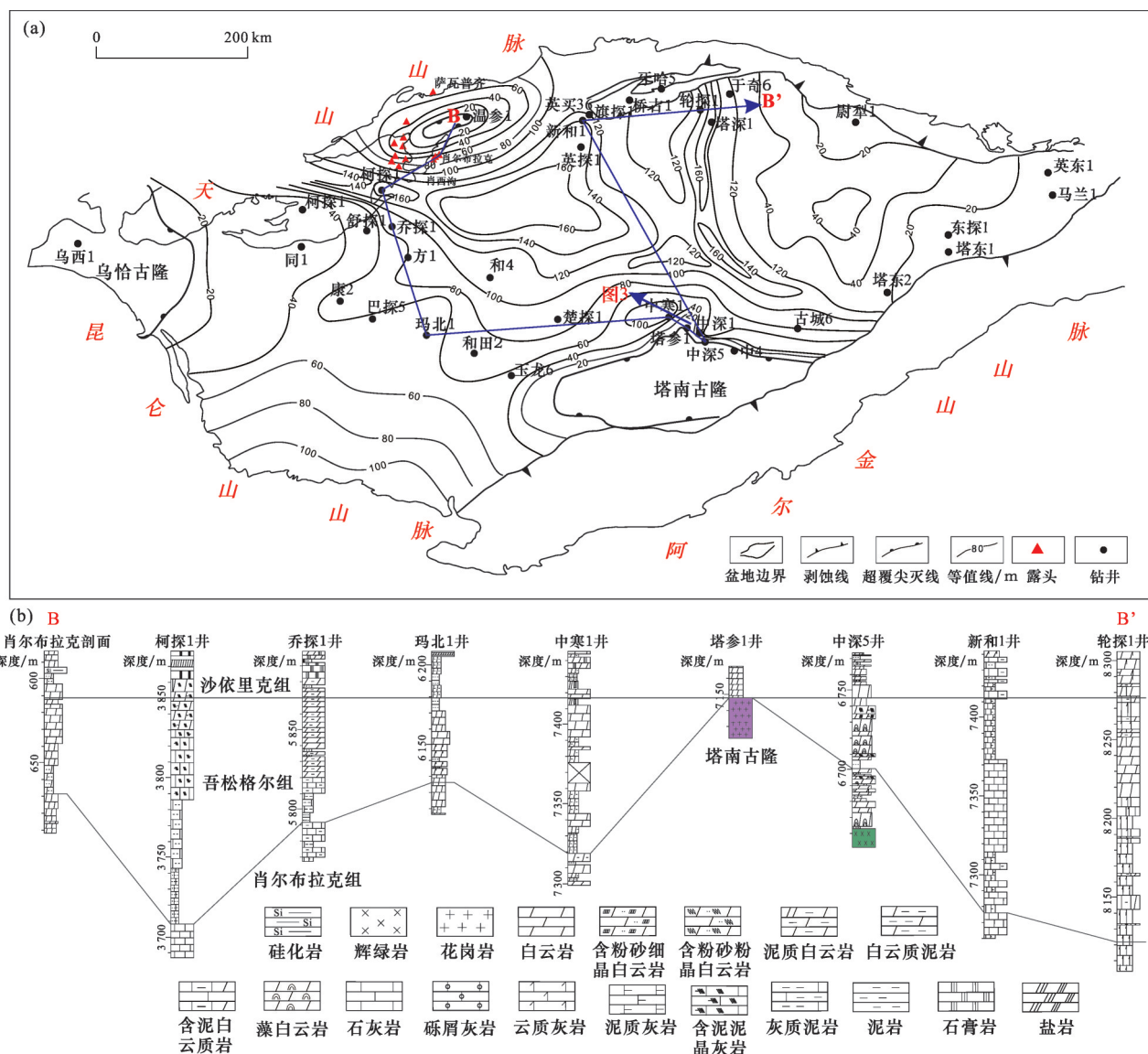


图2 塔里木盆地寒武统吾松格尔组地层厚度等值线(a)与地层对比剖面(b)

Fig.2 Thickness contour map(a) and correlation section(b) of the Lower Cambrian Wusongger Formation, Tarim Basin

AECE则与寒武纪古杯动物群的大规模灭绝基本对应,二者已被证实可作为寒武系内部重要等时对比标志<sup>[14]</sup>。

利用22口钻井、柯坪地区露头资料,结合近期拼接处理的格架地震剖面,编制塔里木盆地寒武统吾松格尔组地层厚度分布图[图2(a)],揭示吾松格尔组分布具有“继承性盆内古(低)隆周缘厚度薄、隆间凹陷厚、周缘盆地薄”的特征。古(低)隆周缘地层厚度一般为30~60 m,隆间凹陷厚度较大,一般为140~180 m。地震同相轴叠置关系分析(图3)和实钻井地层对比结果表明,塔里木盆地寒武统地层沉积整体具“填平补齐”的特点,即玉尔吐斯组→肖尔布拉克组→吾松格尔组依次向基底古隆超覆,吾松格尔组分布面积最大,向古隆区地层厚度减薄。在塔南古隆起和乌恰古隆起核心区,吾松格尔组直接与下伏前寒武纪变质岩基底不整合接触,至台内转为(假)整合接触。

## 2 吾松格尔组沉积期古构造格局

吾松格尔组沉积期古构造格局由古(低)隆起和隆间凹陷组成。

### 2.1 古(低)隆起形成与分布

吾松格尔组沉积期塔里木盆地发育三大盆内古隆起:塔南古隆起、乌恰古隆起及温宿低隆起。隆起周缘吾松格尔组薄,由隆间凹陷向隆起区超覆沉积。塔南古隆起位于且末—塔参1井—玉龙6井一带,落实程度最高、规模最大,东西长约为440 km、南北宽为45~87 km,面积约为 $3.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。塔参1井区缺失下寒武统,中寒武统沙依里克组直接覆盖在花岗岩之上,锆石年龄为 $757 \pm 6.2 \text{ Ma}$ ,属于新元古代。乌恰古隆起位于乌西1—喀什地区,尚无钻井揭示。2020年新采集处理地震大剖面下寒武统、中寒武统地层同相轴向乌西1井区收敛减薄,能够直接证实乌恰古隆起的客观存在<sup>[14]</sup>。温宿低隆起位于现今阿克苏—温宿地区,南西—北东走向,延伸长度为200 km,宽约为80 km,西高东低。截至目前尚无钻井揭示吾松格尔组,但周缘地区发育出露良好的露头群,地层厚度超覆减薄、局部紫红色泥质碳酸盐岩及碎屑岩透镜体等表明早寒武世为低隆起背景,持续控制下寒武统玉尔吐斯组、肖尔布拉克组及吾松格尔组地层展布和沉积分异<sup>[6]</sup>。之所以将其称之为低隆起,与塔南古隆起和乌恰古隆起进行区分,主要是基于阿克苏—温宿地区均有发育玉

尔吐斯组沉积,尽管厚度不大且存在明显的相变现象,仍能够直接证明沉积期地形低于塔南和乌恰两古隆起区,这与柯坪运动后塔里木盆地“南高北低、西高东低”的构造古地理背景一致。

塔南、乌恰及温宿三大盆内古(低)隆起的形成与南华纪初开始的罗迪尼亚(Rodinia)超大陆裂解密切相关<sup>[15-17]</sup>。罗迪尼亚超大陆的裂解导致塔里木板块与周缘羌塘、准噶尔和中天等地块相继分离<sup>[18-19]</sup>,板内形成北部阿瓦提—满加尔和塔西南两个大裂谷体系[图1(a)]。相关岩石学、年代学、地球化学等证据的报道已相对丰富<sup>[16-17]</sup>,如南华系下部和震旦系下部分别测得与初始裂解、末期裂解两大关键阶段相对应的2组年龄<sup>[20-21]</sup>,分别为760 Ma和615 Ma,不再赘述。阿瓦提—满加尔和塔西南古裂谷体系的发育形成了塔里木板块“两隆两凹”的初始古构造格局,两隆是指塔北基底古隆和中央基底古隆(塔中—巴楚),两凹为北部凹陷和塔西南凹陷。震旦纪末柯坪运动使塔里木板块整体抬升改造,周缘进入被动大陆边缘发育阶段,塔西南地区进一步分异为沉积期塔南和乌恰两大古隆。柯坪运动对塔里木板块影响强度存在差异性,塔西南地区存在一定的构造掀斜,整体呈现出“南高北低”,塔北基底古隆靠近温宿地区相对较高,继承演化为早寒武世温宿低隆起(图4)。

塔南古隆起、乌恰古隆起和温宿低隆起对早寒武世沉积具有明显控制作用,尤其是塔南古隆起核心区整体缺失玉尔吐斯组和肖尔布拉克组中下段。至吾松格尔组沉积期,隆起裸露面积进一步缩小,但周缘厚度仅50余米,数倍小于隆间凹陷的地层厚度。

### 2.2 隆间凹陷形成与分布

罗迪尼亚超大陆的裂解形成了北部阿瓦提—满加尔和塔西南两大古裂谷,裂谷内部垒堑结构发育,纵向上先后经历了南华纪裂谷、震旦纪裂—拗转换和早寒武世被动大陆边缘3个演化阶段[图1(c)],期间有过多次活动期和间歇期<sup>[14]</sup>。受阿瓦提—满加尔和塔西南古裂谷活动的影响,在塔南和乌恰古隆起、中央古隆起(塔南—乌恰)和塔北基底古隆起之间形成了隆间凹陷,满加尔古裂谷则演化为东部盆地。温宿低隆起南部发育阿瓦提凹陷,为吾松格尔组沉积期北部凹陷的沉积中心,发育厚150 m以上灰质泥岩、泥灰岩及泥晶白云岩,向东至新和1井区逐渐相变为厚层泥晶灰岩。阿瓦提—新和1井区

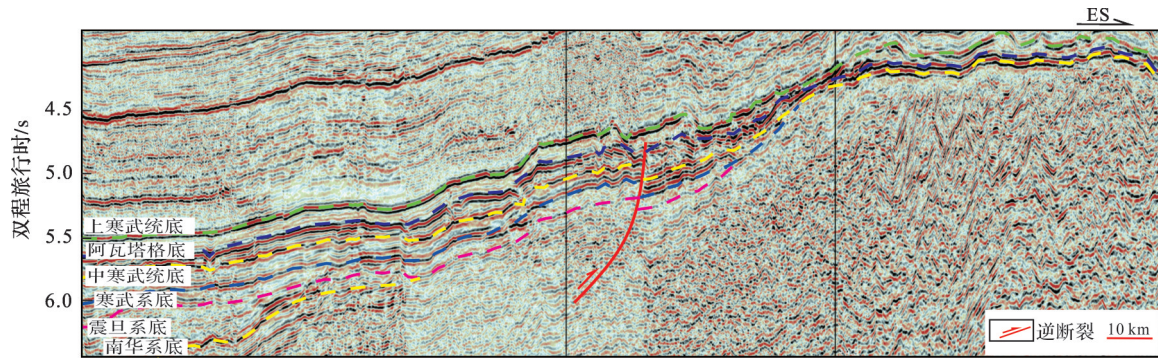
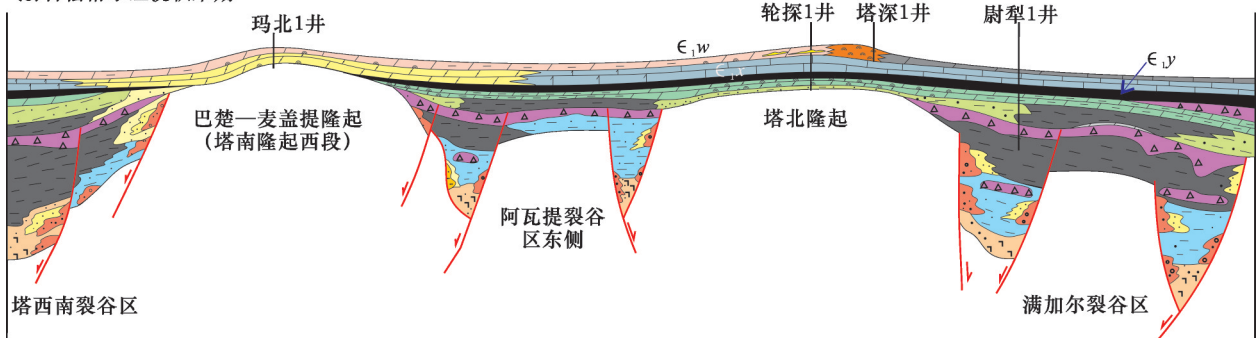


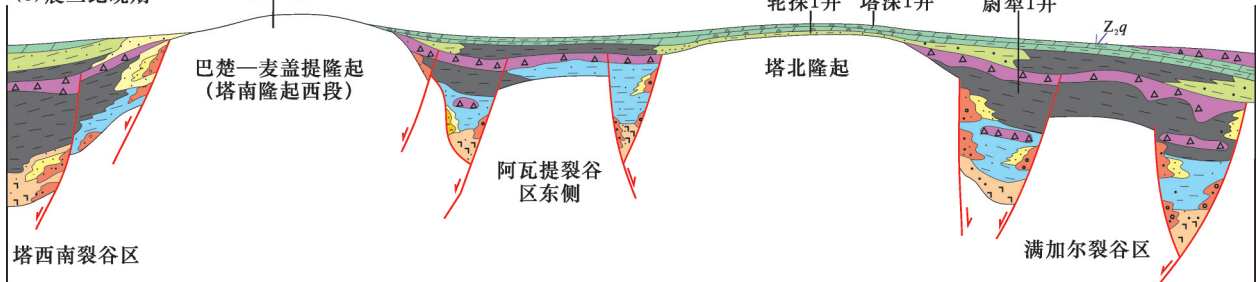
图3 塔南隆起北斜坡缘典型地震剖面(剖面位置见图2)

Fig.3 Typical seismic section in the northern margin of Tanan palaeo-uplift showing overlap and superposition of sedimentary strata from Nanhua to Upper Cambrian (section location see in Fig.2)

(c) 吾松格尔组沉积末期



(b) 震旦纪晚期



(a) 南华纪晚期

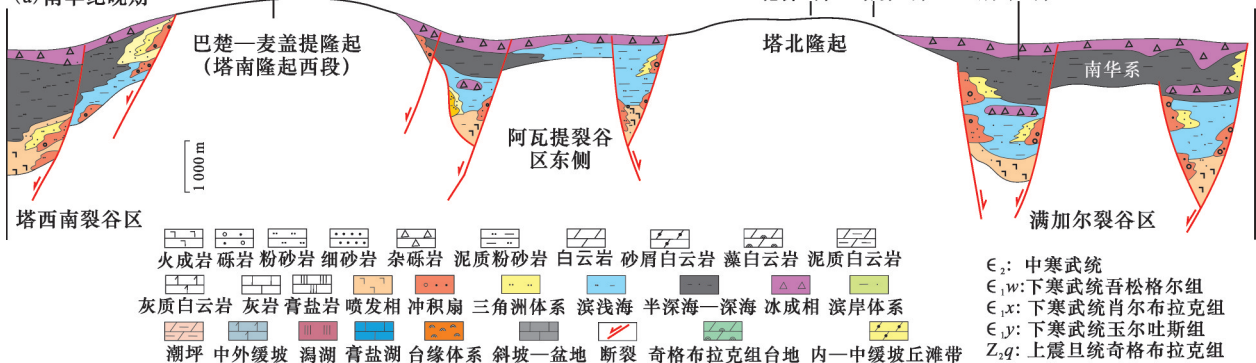


图4 塔里木盆地南华系一下寒武统构造—沉积演化剖面

Fig.4 Tectonic-sedimentary evolution section through Nanhua Formation to Lower Cambrian Formation, Tarim Basin

近东西向展布,台内呈南北分异的整体格局。东部盆地的发育主要因为先期满加尔古裂谷区沉降速

率快及早期深大断裂的活化,沉积厚度相对薄,主要为深灰色、黑色泥质岩和泥晶灰岩沉积。

### 3 沉积特征与岩相古地理

#### 3.1 典型剖面沉积特征

本文重点介绍塔西北肖尔布拉克剖面和柯探1井、塔中中深5井和塔北轮南低凸起地区轮探1井吾松格尔组沉积特征(图5)。

##### 3.1.1 肖尔布拉克剖面

肖尔布拉克剖面位于塔里木盆地西北缘阿克苏地区西南约40 km,构造上位于温宿低隆起南缘。上震旦统奇格布拉克组一下奥陶统蓬莱坝组均出露良好,吾松格尔组厚66.7 m。地层顶部ROECE和底部的AECE碳同位素异常特征清晰,与覆盖区

钻井可对比。相较于西南约50 km的夏特剖面(厚133 m)和78 km的柯探1井(京能公司,厚152.2 m)而言,肖尔布拉克剖面吾松格尔组厚度薄,推测存在典型超覆沉积减薄现象。吾松格尔组主要为一套以富陆缘碎屑和泥质为主的混积潮坪相沉积。底部为一套灰绿色白云质泥岩夹灰(白)色砂屑白云岩,砂屑白云岩厚1.4~4 m。陆源碎屑丰富,具有以“透镜状”或“薄夹层”产状为主,微米级石英颗粒,磨圆与分选中等一好的特点,间接反映了沉积期靠近古隆起的构造古地理背景。中部为近40 m厚的灰黄色粉晶白云岩、细晶白云岩组合,反映整体向上变浅的特征,发育多套薄互层,泥质含量较高。

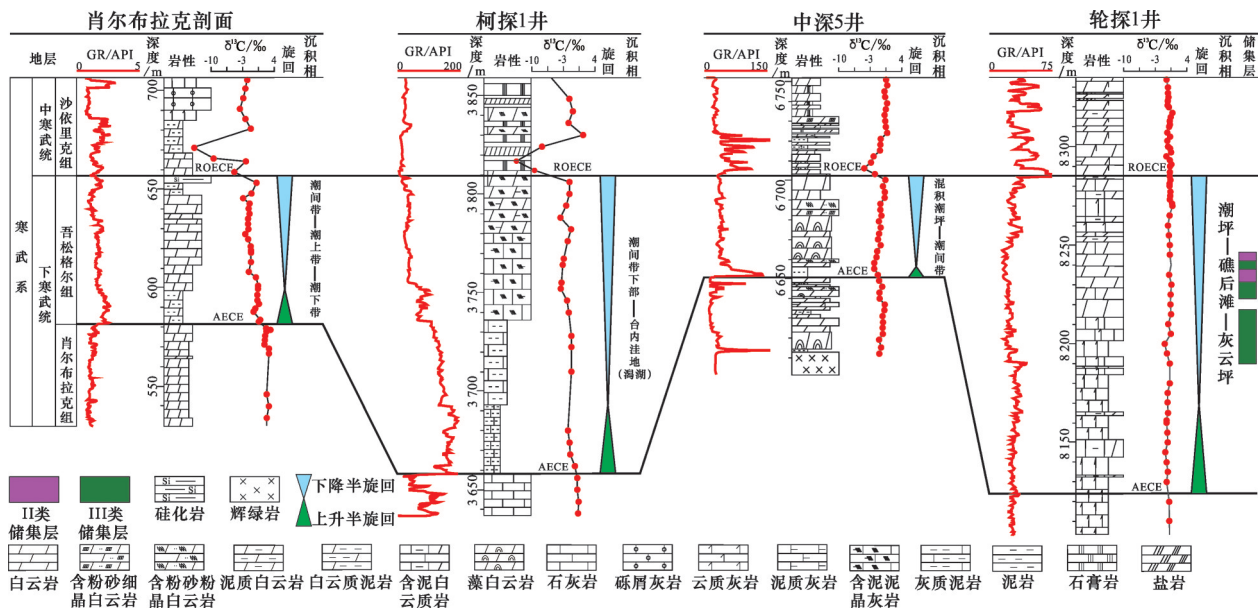


图5 塔里木盆地下寒武统吾松格尔组典型露头与钻井剖面

Fig.5 Typical outcrop and drilling profiles of the Lower Cambrian Wusongger Formation, Tarim Basin

上部陆缘碎屑和泥质含量较中下段均明显减少,局部见竹叶状砾屑白云岩。与肖尔布拉克剖面相类似的还有奥依皮克、夏特等剖面<sup>[9]</sup>。

##### 3.1.2 柯探1井

柯探1井位于温宿低隆起南侧阿瓦提隆间凹陷,是京能公司2019年完钻的一口预探井,井深3 980 m,井底为肖尔布拉克组,吾松格尔组厚152.2 m。相对北部的9个露头剖面及巴楚一塔中等地钻井,地层厚度大且岩性组合以低能背景泥质岩和泥质碳酸盐岩为主。由下至上,柯探1井吾松格尔组可划分为4个岩性段,依次为最下段为31 m厚灰黑色含灰泥岩、中下段为41 m厚灰色灰质泥岩、中上段为44 m厚的灰黑色泥质泥晶灰岩和深灰色白云质泥晶灰岩互层和上段深灰色含泥泥晶白云岩。总体代表半局

限一局限台地沉积,以发育台内洼陷为主要特征。

##### 3.1.3 中深5井

中深5井位于塔里木盆地塔中隆起中部凸起,井深6 805 m,钻穿寒武系至古元古界基底变质岩。下寒武统玉尔吐斯组整体缺失,肖尔布拉克组厚36 m,吾松格尔组厚55 m。2 m间隔的岩屑薄片岩性校正结果表明,吾松格尔组总体为一套靠近古陆的潮坪相沉积。最下部为一套5.5 m厚灰色泥岩,为潮下带一局限潟湖沉积;中部为2套中厚层灰色藻白云岩,夹薄层细晶白云岩、含粉砂粉晶白云岩,水体能量中等,为潮间带藻云坪相沉积;上部则为中一厚层粉晶白云岩和细晶白云岩互层,未见陆源碎屑。相控型白云岩晶粒大小往往与原岩结构具有一定的对应关系<sup>[22]</sup>,白云岩晶粒越大往往代表原始

结构越粗,据此推测认为上部为潮上带—潮间带云坪相沉积。

### 3.1.4 轮探1井

轮探1井位于塔北轮南低凸起地区,井深8 882 m,为亚洲陆上第一深井,钻穿下寒武统,井底为上震旦统苏盖特布拉克组。吾松格尔组顶部埋深8 165 m,厚162 m。垂向上划分为3个岩性段:下段以(深)灰色含泥云灰岩夹薄层含云灰岩为主,为半局限台地沉积;中段为42 m厚的藻砂屑白云岩、藻白云岩及少量含灰白云岩等,该层段也是轮探1井测试获得高产工业油气流的产层段,为局限台地相,以发育礁后滩为主;上段则为灰色含泥灰岩和含灰云岩互层为主,推测与沉积期海平面高频振荡有关,为局限台地沉积。

## 3.2 吾松格尔组台缘带

以下寒武统台缘礁丘为钻探目标的重点探井新和1井和轮探1井在肖尔布拉克组相继失利后<sup>[23]</sup>,对于下寒武统是否发育台缘带这一关键问题的研究一度陷入停滞。利用井震精细标定与同相轴终止反射特征分析方法,提出吾松格尔组沉积期发育塔里木盆地寒武纪第一套台缘建隆,为非典型镶边型台缘,本文称之为“弱镶边型台缘”,并首次利用地震资料将其刻画落实(图6)。

吾松格尔组台地边缘可划分出东部轮南—古城墟和北部拜城—牙哈5井区2段。轮南—古城墟台缘带主要分布在轮南至古城墟北部塔中32井区附近,宽13~30 km,南北延伸长约310 km,面积为7 080 km<sup>2</sup>。地震剖面上,吾松格尔组台缘下超在下伏肖尔布拉克组之上,地形坡折存在明显的向海迁移的特征;上覆中寒武统沙依里克组存在同相轴向海迁移之后逐渐上超的现象,能够说明吾松格尔组沉积前和沉积末期均存在一次明显的相对海平面下降的过程,这与前文已述的顶底普遍发育的ROECE和ACECE碳同位素异常相印证。吾松格尔组台缘呈透镜状“镶嵌”于中寒武统强镶边台缘复合体和肖尔布拉克组缓坡前积层之间,中国石化塔深1井已揭示了这一配置结构。侧向上,吾松格尔组台缘呈超覆尖灭于塔中32井区附近,塔中32井区以南地区吾松格尔组仍表现出碳酸盐岩缓坡的特点,为吾松格尔组沉积期“南高北低”的宏观古地理背景合理性提供了新的证据。至于北部拜城—牙哈5井区台缘带,主要是基于2点证据推测而来:①牙哈5井和轮探3井等钻井吾松格尔组岩性以白云岩相为主,推测沉积期存在一受台缘遮挡的局限成岩地貌;②英买36井等反映出中寒武世台缘明显扩张,推测其台缘应在新和1井以北地区至少50 km处。

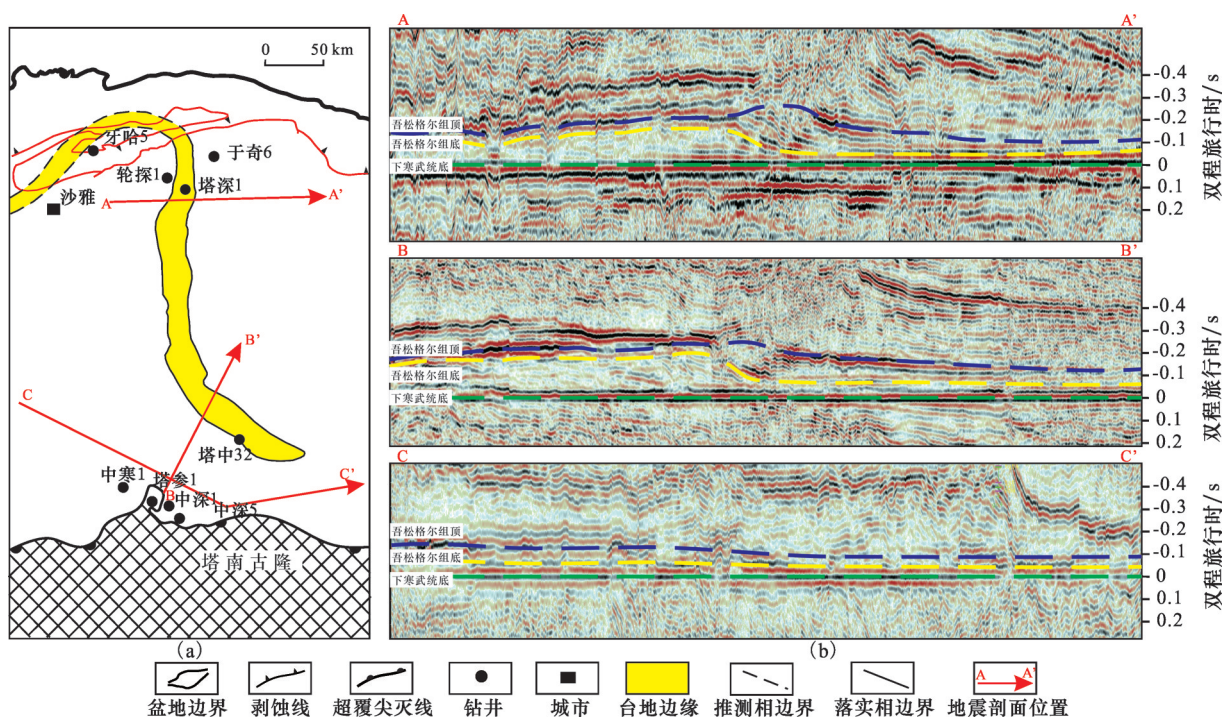


图6 塔里木盆地寒武统吾松格尔组台缘带平面展布图(a)与典型地震剖面(b)

Fig.6 Distribution (a) and typical seismic sections of platform margin (b) of the Lower Cambrian Wusongergel Formation in Tarim Basin

3.3 吾松格尔组沉积期岩相古地理

塔里木盆地下寒武统吾松格尔组主要为混积弱镶边碳酸盐岩台地沉积,局部地区表现出碳酸盐岩缓坡的特点,可划分出混积潮坪、局限一半局限台地、潟湖、台地边缘、斜坡、海盆及缓坡等七大沉积相、16类亚相及若干微相类型(图7,表1)。

吾松格尔组沉积期,塔南古隆起、乌恰古隆起及温宿低隆起已经存在,对台内沉积分异起到明显的控制作用(图8)。塔西南古隆起分布范围和古地形高度最大,塔参1井缺失吾松格尔组,向周缘地层厚度逐渐增厚,如中深5井钻揭约55 m厚的地层。依据周缘钻井岩屑校正结果,靠近古隆起区陆源石

英、钙质砂屑及少量生物碎屑等含量较高,可合理推测紧邻古陆区存在碎屑岩潮坪或滨岸带。由古隆起区向隆间凹陷控制的潟湖区(台内洼陷),岩石组合类型由含陆缘碎屑泥质泥晶白云岩—泥质泥粉晶白云岩逐渐过渡为泥云坪—云坪下的泥质泥粉晶白云岩—颗粒白云岩。颗粒白云岩多以藻砂屑白云岩为主,为“不成熟型”台内颗粒滩,反映了潮坪背景下水体能力整体不高的特点。台内颗粒滩的分布受古隆起控制明显,主要受古隆起周缘水体能力相对较高的古地形高部位,近平行岸线分布,具“面积小、数量多”的特点,单一滩体面积为131~1 261 km<sup>2</sup>,初步预测面积合计7 159 km<sup>2</sup>。塔

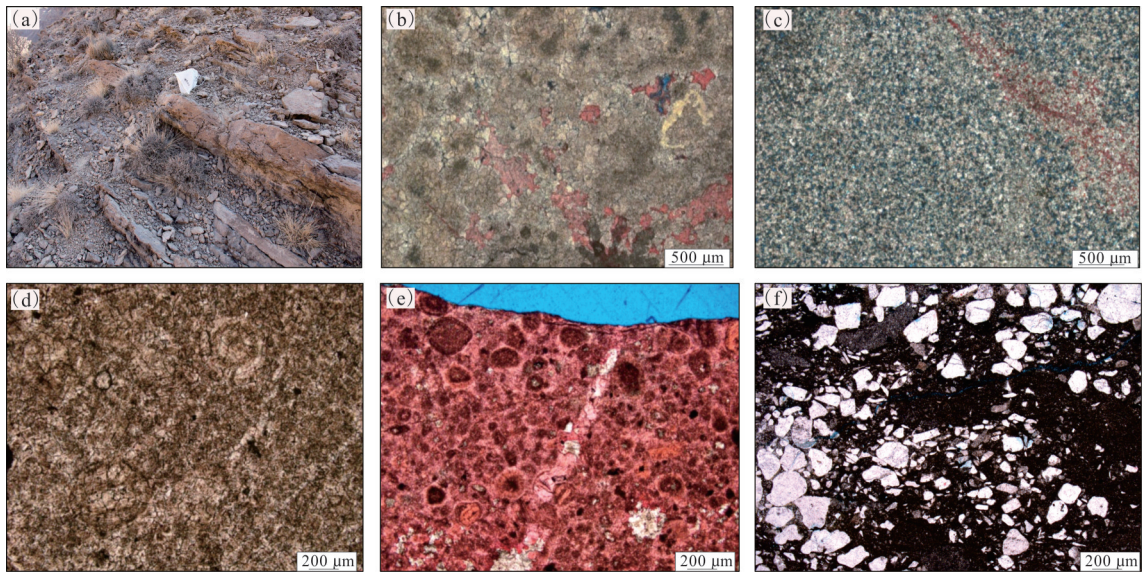


图7 塔里木盆地下寒武统吾松格尔组典型露头 and 薄片照片

Fig.7 Typical photos of outcrop and thin sections from Lower Cambrian Wusong'er Formation, Tarim Basin

(a)薄层中低能滩体与泥粉晶白云岩互层,局限一半局限台地潮坪亚相,夏特剖面;(b)亮晶颗粒白云岩,颗粒滩亚相,夏特剖面,铸体薄片;(c)泥粉晶白云岩,泥云坪亚相,夏特剖面,铸体;(d)含鲕藻砂屑白云岩,礁后滩亚相,轮探1井,8 205 m,岩屑,普通薄片;(e)含鲕藻砂屑白云岩,礁后滩亚相,轮探1井,8 258 m,岩屑,铸体薄片;(f)含陆源碎屑泥粉晶白云岩,混积潮坪亚相,中寒1井,7 368.2 m,岩屑,普通薄片

表1 塔里木盆地下寒武统吾松格尔组沉积体系

Table 1 Sedimentary system of the Lower Cambrian Wusong'er Formation in Tarim Basin

沉积体系	沉积相	亚相	微相与主要岩石类型	分布区域与代表钻井
碳酸盐岩台地	局限一半局限台地	颗粒滩、藻云坪、泥云坪	藻砂屑白云岩、藻纹层白云岩、泥粉晶白云岩、含陆源泥粉晶白云岩	远离三大台内隆起区,如轮南地区等;中寒1井、楚探1井、舒探1井、牙哈5井等
	台地边缘	台缘、礁后滩	砂屑白云岩、藻黏结白云岩	轮南—塔中32井,塔深1井
	斜坡	上斜坡、下斜坡	推测为瘤状碳酸盐岩、浊积岩、条带状泥晶碳酸盐岩等	台地边缘向东靠近盆地区,相对较宽
	缓坡	内缓坡、中缓坡、外缓坡	推测为泥粉晶白云岩、藻纹层白云岩、藻砂屑白云岩、含膏白云岩	塔西南地区,暂无钻井揭示
滨岸、潟湖	混积潮坪	潮上、潮间、潮下	泥坪、沙坪、含陆源碎屑白云岩	三大隆起周缘
	潟湖	泥质岩潟湖	泥质灰岩/灰质泥岩为主	盆地中部主体位置,京能公司柯探1井等
盆地	海盆	海盆	中薄层泥质灰岩、灰质泥岩、泥岩	轮南—塔中32井区台缘带以东的区域,塔东1井、塔东2井等

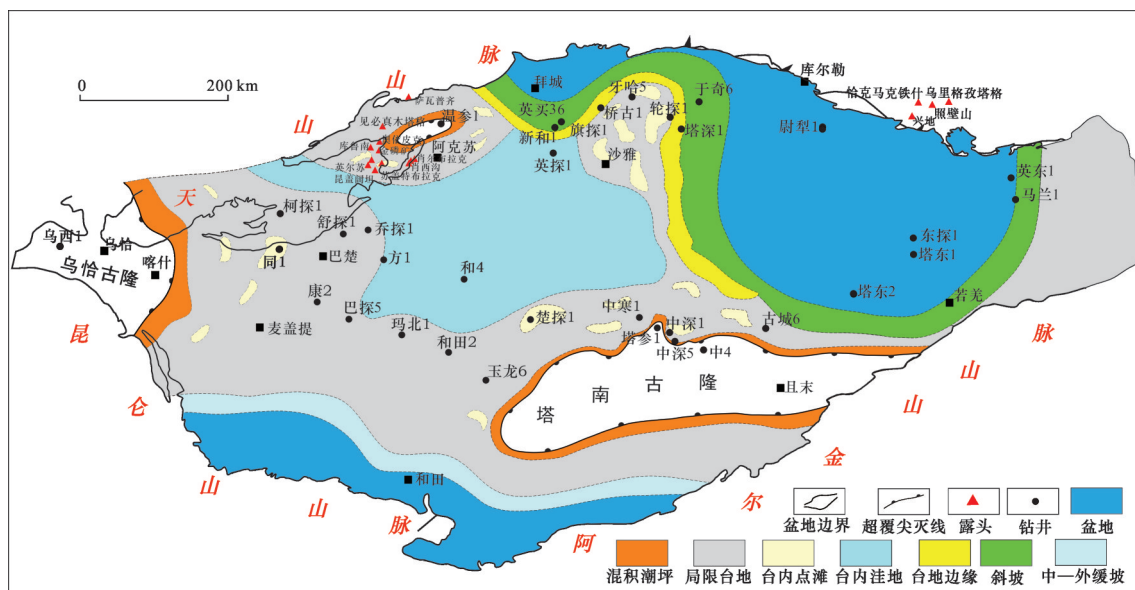


图8 塔里木盆地寒武统吾松格尔组沉积期岩相古地理图

Fig.8 Lithofacies palaeogeographic map of the Lower Cambrian Wusongergel Formation, Tarim Basin

南古隆起北缘碎屑岩潮坪/滨岸—潮坪相泥云坪+台内滩(潮间带)—潟湖的沉积组合在乌恰古隆起、温宿低隆起周缘亦均有发育,白莹等<sup>[8]</sup>和张天付等<sup>[9]</sup>基于野外露头开展的研究也有相关报道。

前文已讨论,塔南古隆起、乌恰古隆起和温宿低隆起的发育客观上形成了“南高北低、西高东低”的地理格局背景,轮南地区发育了寒武系第一套弱镶边型台缘,为典型的被动陆缘环境下沉积型建造。台内潟湖的阻隔和沉积期北东向古洋流的双重影响<sup>[6]</sup>,陆源碎屑含量明显减少,利于轮南—古城墟地区碳酸盐岩台地的发育。古台缘的发育为其后形成局限—半局限的环境提供了良好的障壁条件。在局部高地形的位置发育了多排面积不等、近平行于台缘的礁后颗粒滩(台内滩),以藻砂屑白云岩为主,偶见鲕粒,轮探1井、牙哈5井均有揭示,预测面积为3 800 km<sup>2</sup>。台缘带以东及以北地区逐渐过渡为斜坡—盆地环境,由于台缘为非典型镶边型台缘,斜坡带的宽度相对较大。

位于塔南古隆起和乌恰古隆起之间的塔西南隆间凹陷纵向演化序列相对滞后于北部隆起,且寒武纪至奥陶纪整体呈海平面不断上升,沉积体系向台内退积为主的特征<sup>[14]</sup>。据此推测拜城—牙哈—轮南—古城地区开始发育弱镶边型台缘的时期,塔西南地区仍处于碳酸盐岩缓坡环境,以中—外缓坡为主,水体能量相对较低,推测台内颗粒滩体发育程度较差。

#### 4 油气勘探意义

下寒武统吾松格尔组是塔里木盆地中寒武统膏盐岩盖层之下第一套白云岩沉积地层,轮南低凸起、柯坪断隆等构造已获得重大油气勘探发现,研究其沉积期有利储集相带分布特征对寒武系盐下白云岩领域选区评价、进一步扩展勘探领域具有重要指导意义。对塔里木盆地西北缘柯坪地区夏特、苏盖特布拉克等露头剖面、轮南低凸起地区轮探1井、塔深1井等吾松格尔组储集层特征进行分析(表2)表明:吾松格尔组发育台缘丘滩、礁后滩和潮上带—潮间带薄层台内滩3类白云岩储集层,分布面积较大,具一定规模性。台缘丘滩相和礁后滩相白云岩储集层品质相对较优,评价以Ⅱ类储集层为主。台缘丘滩相储集层孔隙度为1.4%~6.8%,最高渗透率可达 $0.529 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;礁后滩储集层孔隙度为3.1%~3.5%,裂缝—孔洞型储层为主。

吾松格尔组储集层分布与沉积相关系密切,台地边缘、礁后颗粒滩带及潮坪相薄层台内滩等构成吾松格尔组储集层发育的重要物质基础<sup>[9,22]</sup>。与高频层序相关的准同生期岩溶作用促进了有效孔隙的发育,早期白云岩化则增强了储集层的抗压能力,使其在深层—超深层环境下依然得到有效保持。埋藏期岩溶—热液溶蚀形成的孔洞及构造裂缝构成是储集空间的重要补充。基于沉积相分析及地球物理综合预测,台缘丘滩相和礁后滩相白云岩储集层面积为12 070 km<sup>2</sup>,分布在轮南低凸起—

表2 塔里木盆地寒武统吾松格尔组储集层类型、成因及分布特征

Table 2 Reservoir types, development mechanism and distribution of Lower Cambrian Wusonger Formation in Tarim Basin

序号	储集层类型	基本特征	成因机制	分布特征	资料点
1	台缘丘滩相白云岩储集层	储集岩性为藻黏结白云岩、(残余)藻砂屑白云岩、细一中晶白云岩等;藻格架孔、粒间(溶蚀)孔、晶间孔及裂缝为主要主要储集空间;孔隙度为1.4%~6.8%、最高渗透率为 $0.529\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ;测井解释Ⅱ类储层14 m/1层	“大丘小滩”,丘是储集层孔隙的载体;孔隙主要形成于丘滩体原始孔隙,早表生期淡水溶蚀;埋藏—热液溶蚀形成的孔洞是重要补充	轮南低凸起—古城墟北(塔中32井区),面积约7 080 km <sup>2</sup>	塔深1井
2	礁后滩相白云岩储集层	储集岩性为砂屑白云岩、粉—细晶白云岩等;粒间(溶蚀扩大)孔、晶间孔等为主,裂缝发育;孔隙度为3.1%~3.5%,裂缝—孔洞型储层;测井解释Ⅱ类11 m/2层,Ⅲ类40 m/3层	台内颗粒滩是储集层发育重要物质基础;与高频层序相关的准同生期岩溶是储集层发育的关键;早期白云岩化利于孔隙的有效保持	分布在台缘带之后的轮南—古城地区,面积4 999 km <sup>2</sup>	轮探1井
3	潮上带—潮间带薄层台内滩相白云岩储集层	储集岩性以颗粒白云岩、藻云岩为主,与泥质白云岩频繁互层发育,单层厚0.5~1.2 m;储集空间以晶间微溶孔、粒间溶孔为主,孔隙度为2%~3%	潮坪相薄层藻屑滩构成储层发育物质基础;孔隙主要形成于滩体早表生淡水溶蚀;微生物诱导早期白云岩化对孔隙保持关键作用	塔南、乌恰、温宿古隆周缘	夏特剖面、中深1井、中深5井等

古城墟地区;潮坪相薄层台内滩相白云岩储集层储集性能相对较差,具层薄套数多的特点,虽然预测面积也达到7 159 km<sup>2</sup>,但裂缝是否发育可能是是否具有规模储集能力的重要前提。

综合分析中寒武统膏盐岩盖层、北部生烃凹陷(阿瓦提—满加尔地区)玉尔吐斯组烃源岩<sup>[24]</sup>与吾松格尔组储集层的源—储—盖配置关系及古今构造的继承性和稳定性,认为吾松格尔组油气勘探具三大有利条件:①随着中寒武世塔西台地明显扩张,厚层广布的膏盐岩能够全覆盖吾松格尔组台缘带—礁后滩相白云岩储层,构成有效储盖组合;②北部生烃凹陷玉尔吐斯组烃源岩落实程度高,品质较优且轮探1井已获重大勘探突破,证实了烃源岩的发育且可规模供烃成藏。轮探1井钻揭下寒武统玉尔吐斯组深灰色泥质灰岩、黑色灰质泥岩,22 m, TOC值最高达13.29%(岩屑与岩心样品共计97个);③古城墟隆起为长期继承稳定发育的塔中隆起的一部分;塔北古隆起形成早、定型早,为残余型古隆起,大型背斜构造背景利于油气长期聚集和保存。评价结果认为塔北轮南低凸起—古城墟地区(塔中32井区)具有良好油气成藏条件,勘探潜力大幅度提升,初步解决了塔北地区肖尔布拉克组油气勘探失利后寒武系盐下白云岩领域层系接替和区带评价的关键问题,是下一步探索的重点区带,已支撑推动轮探3井上钻。

5 结论

(1)塔里木盆地寒武统吾松格尔组沉积期发

育塔南古隆、乌恰古隆和温宿低隆及边缘凹陷等构造古地理单元,对吾松格尔组沉积充填序列及地层分布具明显的控制。古隆起区吾松格尔组超覆沉积、厚度薄,发育混积潮坪及弱镶边台地相;边缘(隆间)凹陷地层齐全、厚度大,发育深水盆地相和局限潟湖相。

(2)吾松格尔组沉积总体表现为一个完整的“海侵—海退”沉积旋回,轮南—古城地区发育塔里木盆地寒武系第一套弱镶边台缘建隆,联合控制沉积期混积潮坪—弱镶边碳酸盐岩台地的发育。

(3)吾松格尔组发育台缘丘滩、礁后滩及潮上—潮间带薄层台内滩3类白云岩储集层,其中台缘丘滩、礁后滩相白云岩储集层品质相对较优,主要分布于轮南低凸起—古城墟地区(塔中32井区),预测面积达12 070 km<sup>2</sup>。吾松格尔组储集层与中寒武统膏盐岩、玉尔吐斯组烃源岩构成优质源—储—盖组合,改变了以往整体富泥质的传统观点,提升了油气勘探潜力,轮南低凸起—古城墟地区是下步油气勘探的有利区。

参考文献(References)

[1] 杜金虎,潘文庆.塔里木盆地寒武系盐下白云岩油气成藏条件与勘探方向[J].石油勘探与开发,2016,43(3):327-339.  
DU J H, PAN W Q.Accumulation conditions and play targets of oil and gas in the Cambrian subsalt dolomite, Tarim Basin, NW China[J].Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3):327-339.  
[2] 王招明,谢会文,陈永权,等.塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生气藏的发现与勘探意义[J].中国石油勘探,2014,19(2):1-13.

- WANG Z M, XIE H W, CHEN Y Q, et al. Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Well Zhongshen1 in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(2): 1-13.
- [3] ZHU G Y, HUANG H P, WANG H T. Geochemical significance of discovery in Cambrian reservoirs at Well ZS1 of the Tarim Basin, Northwest China [J]. Energy & Fuels, 2015, 29(3): 1332-1344.
- [4] 胡安平, 沈安江, 梁峰, 等. 激光铀铅同位素定年技术在塔里木盆地肖尔布拉克组储层孔隙演化研究中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 37-49.
- HU A P, SHEN A J, LIANG F, et al. Application of laser in-situ U-Pb dating to reconstruct the reservoir porosity evolution in the Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 37-49.
- [5] 郑剑锋, 潘文庆, 沈安江, 等. 塔里木盆地柯坪露头区寒武系肖尔布拉克组储集层地质建模及其意义 [J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 1-13.
- ZHENG J F, PAN W Q, SHEN A J, et al. Reservoir geological modeling and significance of Cambrian Xiaerbulake Formation in Keping outcrop area, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 1-13.
- [6] 朱永进, 倪新锋, 刘玲利, 等. 裂后沉降期碳酸盐岩缓坡沉积响应及成储特征——以塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组为例 [J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 1044-1057.
- ZHU Y J, NI X F, LIU L L, et al. Depositional differentiation and reservoir potential and distribution of ramp system during post-rift period: An example from the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in the Tarim Basin, NW China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(5): 1044-1057.
- [7] 杨海军, 陈永权, 田军, 等. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 62-72.
- YANG H J, CHEN Y Q, TIAN J, et al. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in Well Luntan-1 of the Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 62-72.
- [8] 白莹, 徐安娜, 刘伟, 等. 塔里木盆地西北部中下寒武统混积岩沉积特征 [J]. 天然气工业, 2019, 39(12): 46-57.
- BAI Y, XU A N, LIU W, et al. Sedimentary characteristics of Lower and Middle Cambrian diamict in the northwestern Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(12): 46-57.
- [9] 张天付, 黄理力, 倪新锋, 等. 塔里木盆地柯坪地区下寒武统吾松格组岩性组合及其成因意义和勘探意义——亚洲第一深井轮探1井突破的启示 [J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 928-940.
- ZHANG T F, HUANG L L, NI X F, et al. Lithological combination genesis and exploration significance of the Lower Cambrian Wusonger Formation of Kalpin area in Tarim Basin: Insight through the deepest Asian onshore well-Well Luntan 1 [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 928-940.
- [10] 刘存革, 李国蓉, 罗鹏, 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 C G, LI G R, LUO P, 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.
- [11] 沈安江, 张友, 冯子辉, 等. 塔东古城地区碳酸盐岩储层地质认识与勘探领域 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 96-106.
- SHEN A J, ZHANG Y, FENG Z H, et al. Geoloical understandings and exploration prospects of carbonate reservoirs in Gucheng area, Tadong, Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 96-106.
- [12] 陈永权, 黄金华, 杨鹏飞, 等. 塔西台地寒武系碳同位素地层学与时间框架 [J]. 地质论评, 2020, 66(S1): 9-10.
- CHEN Y Q, HUANG J H, YANG P F, et al. Carbon isotope chemostratigraphy and time frame of Cambrian in western platform, Tarim Basin [J]. Geological Review, 2020, 66(S1): 9-10.
- [13] 朱茂炎, 杨爱华, 袁金良, 等. 中国寒武纪综合地层和时间框架 [J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(1): 26-65.
- ZHU M Y, YANG A H, YUAN J L, et al. Synthetic stratigraphy and time frame of the Cambrian in China [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2019, 49(1): 26-65.
- [14] 田雷, 张虎权, 刘军, 等. 塔里木盆地西南部南华纪—震旦纪裂谷分布及原型盆地演化 [J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1-12.
- TIAN L, ZHANG H Q, LIU J, et al. Distribution of Nanhua-Sinian and proto-type basin evolution in southwestern Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1-12.
- [15] 管树巍, 张春宇, 任荣, 等. 塔里木北部早寒武世同沉积构造——兼论寒武系盐下和深层勘探 [J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1075-1086.
- GUAN S W, ZHANG C Y, REN R, et al. Early Cambrian syndepositional structure of the northern Tarim Basin and a discussion of Cambrian subsalt and deep exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1075-1086.
- [16] 吴林, 管树巍, 杨海军, 等. 塔里木北部新元古代裂谷盆地古地理格局与油气勘探潜力 [J]. 石油学报, 2017, 38(4): 375-385.
- WU L, GUAN S W, YANG H J, et al. The paleogeographic framework and hydrocarbon exploration potential of Neoproterozoic rift basin in northern Tarim Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2017, 38(4): 375-385.
- [17] 任荣, 管树巍, 吴林, 等. 塔里木盆地新元古带裂谷盆地南北分异及油气勘探启示 [J]. 石油学报, 2017, 38(3): 255-266.
- REN R, GUAN S W, WU L, et al. The north-south differentiation characteristic and its enlightenment on oil-gas exploration of the Neoproterozoic rift basin, Tarim Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2017, 38(3): 255-266.
- [18] 林畅松, 李思田, 刘景彦, 等. 塔里木盆地古生代重要演化阶段的古构造格局与古地理演化 [J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 210-218.
- LIN C S, LI S T, LIU J Y, et al. Tectonic framework and paleogeographic evolution of the Tarim Basin during the Paleozoic major evolutionary stages [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 210-218.
- [19] ZHU G Y, CHEN Z Y, CHEN W Y, et al. Revisiting to the Neoproterozoic tectonic evolution of the Tarim Block, NW China [J]. Precambrian Research, 2021, 352: 1-16.
- [20] 严威, 郭光辉, 张艳秋, 等. 塔里木盆地震旦纪—寒武纪构造格局及其对寒武纪古地理的控制作用 [J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(3): 455-466.

- YAN W, WU G H, ZHANG Y Q, et al. Sinian-Cambrian tectonic framework in the Tarim Basin and its influences on the paleogeography of the Early Cambrian[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2018, 42(3): 455-466.
- [21] 邬光辉, 李浩武, 徐彦龙, 等. 塔里木克拉通基底古隆起构造—热事件及其结构与演化[J]. *岩石学报*, 2012, 28(8): 2435-2452.
- WU G H, LI H W, XU Y L, et al. The tectonothermal events, architecture and evolution of Tarim craton basement palaeo-uplifts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 2435-2452.
- [22] 沈安江, 郑剑锋, 陈永权, 等. 塔里木盆地中下寒武统白云岩储集层特征、成因及分布[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(3): 340-349.
- SHEN A J, ZHENG J F, CHEN Y Q, et al. Characteristics, origin and distribution of dolomite reservoirs in Lower-Middle Cambrian, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 340-349.
- [23] 熊益学, 陈永权, 关宝珠, 等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组北部台缘带展布及其油气勘探意义[J]. *沉积学报*, 2015, 33(2): 408-415.
- XIONG Y X, CHEN Y Q, GUAN B Z, et al. Distribution of northern platform margin and implications to favorable exploration regions on Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(2): 408-415.
- [24] 朱光有, 陈斐然, 陈志勇, 等. 塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(1): 8-21.
- ZHU G Y, CHEN F R, CHEN Z Y, et al. Discovery and basic characteristics of the high quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geosciences*, 2016, 27(1): 8-21.

## Lithofacies paleogeography and exploration significance of Lower Cambrian Wusonger Formation depositional stage, Tarim Basin, NW China

ZHU Yongjin<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Jianfeng<sup>1,2</sup>, LIU Lingli<sup>1</sup>, FENG Guang<sup>4</sup>, WU Feng<sup>5</sup>,  
YAN Lei<sup>3</sup>, ZHANG Tianfu<sup>1,2,3</sup>

(1. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, China;

2. Key Laboratory of Carbonate Reservoir, PetroChina, Hangzhou 310023, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

4. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China;

5. Research Institute of Yanchang Petroleum(Group) Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Great breakthroughs have been made in oil and natural gas exploration in Wusonger Formation of the Lower Cambrian in Tarim Basin, NW China, but there is almost no research on the sedimentary background conditions. The sedimentary paleogeographic pattern, sedimentary environment and distribution of reservoir were systematically analyzed based on outcropping data in Aksu area, logging cuttings, C/O isotopic curves, well logs and seismic data. The results indicated that: (1) The sedimentary sequence and stratigraphic distribution of the Wusonger Formation in Tarim Basin were controlled by paleo-uplift and marginal sags. The Wusonger Formation in the paleo-uplift region was over-layed with thin thickness, including mixed carbonate-siliciclastic tidal flat and weakly rimmed platform facies. The strata in the marginal sag are complete and thick, and the deep-water basin facies and confined lagoon facies are developed. (2) The sedimentary sequence of the Wusonger Formation is generally characterized by a complete “transgression and regression” sedimentary cycle. The Wusonger Formation depositional stage platform margin was recognized from Lunnan area to Gucheng area, which jointly controls the development of carbonate-siliciclastic tidal flat and weakly rimmed platform during the sedimentary period. It is the first set platform margin of the Cambrian in Tarim Basin. (3) The Wusonger Formation has types of dolomite reservoirs, platform margin mound-shoals, reef back shoal and thin-layer platform inner shoals in the intertidal zone, with large area distribution. The first two types, mainly developed in the Lunnan-Gucheng areas, are of high quality and up to 12 070 km<sup>2</sup>. Together with the upper Mid-Cambrian gypsum-salt rock, they form the first set of effective assemblage of the Cambrian pre-salt realm. As Well Luntan1 has obtained industrial oil-gas flow in 2020, this assemblage is considered to be favorable regions for ultra-deep oil and gas exploration.

**Key words:** Paleo-uplift; Mixed carbonate-siliciclastic tidal flat; Weakly rimmed platform; Wusonger Formation; Lower Cambrian; Tarim Basin

**Foundation item:** The Scientific Research and Technology Development Project of CNPC(Grant No. 2021DJ05).