

文章编号:1000-0550(2020)02-0398-13

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.045

塔里木盆地晚震旦世—中寒武世构造沉积充填过程及油气勘探地位

朱永进^{1,2,3}, 沈安江^{1,2}, 刘玲利¹, 陈永权⁴, 俞广^{1,3}

1. 中国石油杭州地质研究院, 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, 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

摘要 南华纪初,受罗迪尼亚(Rodinia)超级大陆裂解的影响,塔里木陆块进入强伸展构造演化阶段,陆内发育了北东—南西向裂谷体系,裂谷区与两侧高隆带构成“两隆夹一坳”古构造格局。这一古构造格局持续控制了晚震旦世至中寒武世碳酸盐岩沉积序列的充填、演化及油气成藏组合,应将受前寒武纪裂谷构造—沉积演化控制的系列碳酸盐岩台地作为一个成因整体进行系统研究。结果表明:晚震旦世—中寒武世碳酸盐岩台地先后经历了5个重要演化阶段,即晚震旦世同裂谷充填期、震旦纪末抬升剥蚀阶段、早寒武世初海侵深水缓坡型富泥质碳酸盐岩台地阶段、浅水缓坡型碳酸盐岩台地阶段,以及中寒武世蒸发潟湖占主导镶边型碳酸盐岩台地阶段。控制了两套烃源岩、两套储层及一套区域盖层的发育,即形成于震旦纪裂陷槽内潜在烃源岩和早寒武世深水缓坡阶段玉尔吐斯组烃源岩、震旦纪末期受剥蚀淋滤形成的上震旦统微生物丘滩相白云岩储层和早寒武世受岩相和早期云化联合控制的肖尔布拉克组丘滩相白云岩储层,以及中寒武统蒸发潟湖相蒸发岩盖层,构成了上、下两套有效油气成藏组合。与已获得重大突破的四川盆地同期德阳—安岳克拉通内裂陷沉积演化序列及油气成藏组合类比表明,与之具有良好的相似性,且主力烃源岩品质、直接盖层的封盖性能更优于安岳特大型气藏,认为塔里木盆地这一构造—沉积单元具有重要的勘探前景与地位,上部成藏组合更具现实勘探价值。

关键词 构造—沉积响应;成藏组合;勘探地位;晚震旦世—中寒武世;塔里木盆地

第一作者简介 朱永进,男,1984年出生,博士,高级工程师,深层—超深层碳酸盐岩沉积储层及风险评价,

E-mail: zhuyj_hz@petrochina.com.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

自1995年位于巴楚隆起的和4井揭示出塔里木盆地中—下寒武统发育有效储—盖组合以来,针对寒武系盐下(上震旦统一中寒武统)碳酸盐岩层系的油气勘探从未停止,先后经历了“聚焦巴楚隆起,预探大构造”(1995—1998年)、“持续探索巴楚隆起”(2004—2011年)、“探索塔中继承性古隆起寒武系盐下大背斜”(2012—2014年)、“再探巴楚与塔中两大领域”(2014年—现今)等四个重要勘探阶段。勘探结果喜忧参半,喜的是下寒武统玉尔吐斯组发育高品质烃源岩、肖尔布拉克组发育优质白云岩储层已

形成基本共识,且2013年位于塔中隆起的ZS1获得工业气流,实现了寒武系盐下碳酸盐岩层系的战略突破^[1];忧的是截至目前对巴楚隆起的探索全面失利,巴楚周缘是否发育主力烃源灶及其分布特征亟待明确;塔北隆起关键钻井XH1井和塔中隆起YL6井等关键风险探井因出现明显相变而失利、塔中隆起中深井区突破后亦未形成规模性发现,古构造格局的重新认识及其对源、储、盖等关键石油地质要素的控制已成为制约当前勘探部署的关键问题之一。

自南华纪开始,关于塔里木陆块受罗迪尼亚超大陆裂解活动影响在陆内发育裂谷体系的证据及成因解释模式已多有报道^[2],然而与裂谷体系构造演化

收稿日期:2019-01-23; 收修改稿日期:2019-04-24

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05004-002); 中国石油重大科技项目(2018A-0103, 2018A-0105) [Foundation: National Science and Technology Major Project, No.2016ZX05004-002; Key Project of the PetroChina Research Program, No. 2018A-0103, 2018A-0105]

阶段相匹配的沉积充填序列重建却缺乏系统性研究。已发表文献主要集中在露头烃源岩地球化学评价、微生物丘或“台缘带”储层地质建模、储层表征与成岩分析等方面,未能形成以古裂古体系演化为主线的系统的古地理响应特征认识^[3-5],有效油气成藏组合等整体研究更是鲜有报道。四川盆地震旦系—寒武系安岳特大型气藏解剖表明古裂陷、古隆起、古丘滩及古圈闭等控制了深层海相碳酸盐岩的油气聚集成藏^[6-7],为塔里木盆地寒武系盐下碳酸盐岩层系油气勘探提供了重要的借鉴。以钻揭寒武系盐下碳酸盐岩的20余口钻井、柯坪地区9个露头剖面点及42条最新处理覆盖全盆地二维地震大测线为基础,以构造—沉积演化为基本切入点,重点讨论了三个问题:1)上震旦统一中寒武统构造—岩相古地理特征;2)油气成藏要素的发育及有利组合;3)油气勘探潜力分析,尝试阐明当前寒武系盐下碳酸盐岩勘探中的基础关键问题,以期为下步勘探提供依据。

1 区域地质背景

塔里木盆地是一个夹持于天山山脉和昆仑山脉之间、东侧以阿尔金断裂带为界的大型叠合盆地,面积达 $56\times 10^4\text{ km}^2$ 。现今盆地内部划分出“四隆五坳”9个一级构造单元(图1),其中中央隆起带(巴楚隆起—塔中隆起)和塔北隆起是寒武系盐下碳酸盐岩层系油气勘探的重点构造区域。自南华纪初至下古生界早期,塔里木陆块经历了一次区域性强伸展构造运动,岩石学、年代学及地球化学等证据均直接或间接证实此构造运动与罗迪尼亚(Rodinia)超大陆及冈瓦纳(Gondwana)大陆聚合—裂解事件密切相关^[8-13]。随着罗迪尼亚超大陆的裂解,塔里木板块与西南的羌塘地块、东北侧的准噶尔地块及北侧的中天山地块相继分离^[8-9],其内部也出现了裂谷相玄武岩,标志着塔里木板块整体进入裂谷体系发育阶段。裂谷体系整体呈近北东—南西走向,按照现今位置可以划分为塔东北裂谷、塔西南裂谷^[14]及塔西北裂谷三个次级体系^[2],裂谷发育区域和南北两侧的高隆带构成“两隆夹一坳”的古构造格局。震旦纪末,受柯坪运动影响,塔里木陆块整体抬升,南华系—震旦系沉积遭受不同程度的剥蚀,也造就了早寒武世裂后沉降期古地貌。晚震旦世至早寒武世,塔里木陆块周缘已是大洋环绕,位于 30° N 至赤道附近,古气候以湿热为主,利于碳酸盐岩台地的形成与发育^[8]。裂谷体

系发育阶段形成的隆坳相间古构造格局,对晚震旦世一早/中寒武世碳酸盐岩沉积分异产生贯彻始终的控制作用。

塔里木盆地南华系一下震旦统发育了一套厚达3 500~4 000 m以粗碎屑为主,夹泥岩、碳酸盐岩的沉积地层,期间发育多套火山喷发岩、侵入岩及四套区域性冰碛砾岩^[15],记录了裂谷初期—鼎盛初期的沉积序列。上震旦统奇格布拉克组及上覆中下寒武统均为碳酸盐岩沉积。奇格布拉克组为一套分布在中央隆起带以北地区的以蓝细菌藻白云岩、颗粒白云岩为主的地层,可见大量叠层石。寒武纪开始,塔里木盆地进入裂后沉降阶段,呈现出东西分异^[16],其中轮南—古城台地边缘以西的塔西台地是论文研究的重点。下寒武统自下而上划分为玉尔吐斯组、肖尔布拉克组及吾松格尔组。玉尔吐斯组是一套以黑色泥页岩、薄层含磷结核硅质泥岩为主的海泛期沉积;肖尔布拉克组可划分为三个岩性段,下段为深灰色—黑灰色薄层泥晶云岩、中段发育薄层—中厚层(藻)颗粒白云岩/泡沫棉层白云岩及藻云岩、上段则发育薄层泥质藻(纹层)白云岩夹薄层颗粒滩云岩;吾松格尔组表现出薄—中层泥质白云岩与泥粉晶白云岩互层的特征,局部见薄—中厚层膏盐岩。随着台地的“桶状”局限结构逐渐形成与古气候变得更加干旱炎热,中寒武统发育了巨厚的蒸发岩,最厚达400 m以上,垂向上划分为沙依里克组和阿瓦塔格组,除沙依里克组顶部发育一套40~60 m厚灰岩外,均表现为中—厚层膏盐岩夹膏云岩或含泥云岩(图1)。

2 晚震旦世—中寒武世构造—岩相古地理

自晚震旦世至中寒武世,塔里木盆地先后发育了晚震旦世缓坡型碳酸盐岩台地、早寒武世玉尔吐斯期深水缓坡(或陆棚)、早寒武世中—晚期缓坡型—弱镶边型碳酸盐岩台地及中寒武蒸发潟湖占主导的镶边型碳酸盐岩台地。

2.1 晚震旦世缓坡型碳酸盐岩台地

晚震旦世奇格布拉克期,塔里木盆地整体继承了南华纪—早震旦世陆内裂谷体系发育形成的“两隆夹一坳”古构造格局,喀什—巴楚—且末一带南部基底高隆带依然存在,北部高隆带则已被沉积地层所覆盖。早震旦世填平补齐基础上,随着陆源碎屑输入的减少,碳酸盐岩沉积逐渐占据主导。以目前

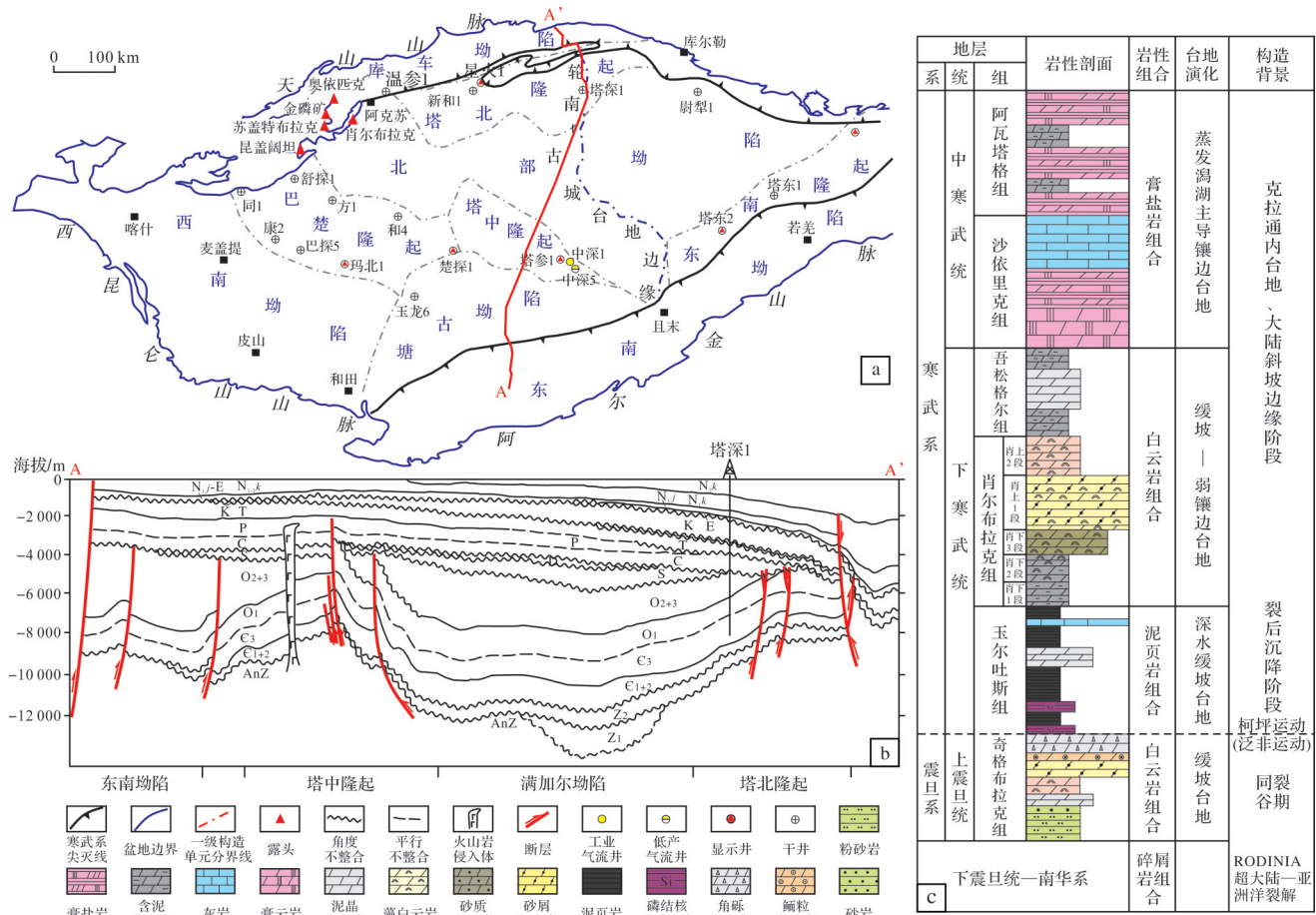


图1 塔里木盆地构造分区简图(a);南北向构造—地层结构剖面(TLM-Z250线)(b);地层综合柱状图(c)
(据文献[2-3]修改汇编)

Fig.1 Sketch map of tectonic units in the Tarim Basin (a) with the location of south to north oriented structural-stratigraphic section (Line TLM-Z250) (b); and composite stratigraphic section of the Tarim Basin from the Pre-Cambrian through the Mid-Cambrian (c)

钻揭上震旦统少量钻井、周缘露头及覆盖全盆地二维地震大测线初步落实了晚震旦世构造—岩相古地理,推测奇格布拉克组沉积期为一套同裂谷期间歇稳定期的缓坡型碳酸盐岩台地体系,沉积分异受控于前期古地貌及断裂差异沉降(图2)。阿瓦提坳陷、满加尔坳陷及塔西南麦盖提—和田之间依然存在水体较深沉积区域,发育下缓坡—盆地、陆棚相暗色泥质(晶)白云岩、泥质岩等岩性,塔东露头区见厚层黑色泥页岩,发育潜在烃源岩。南部高隆带北缘及北部高隆带存在浅水高能区域,以中缓坡微生物白云岩、颗粒白云岩、结晶白云岩等岩性组合为主,柯坪野外露头区可见典型蓝细菌微生物岩、鲕粒白云岩;星火1、温参1、桥古1及塔东1、塔东2等井已钻遇这套沉积,宽15~80 km,东西延伸420 km,分布面积超过26 500 km²。最新研究表明,轮古15井以东及以南地区发育5个规模不等的小型洼槽,槽缘可见弱

丘状反射,推测为微生物岩或颗粒岩为主的碳酸盐岩建隆。震旦纪末,受柯坪运动影响,塔里木板块整体抬升遭受剥蚀,发育了震旦系—寒武系大型不整合界面,奇格布拉克组遭受长期风化淋滤^[17-19]。靠近南北两侧高隆带,上震旦统地层削截特征明显,向阿瓦提—满加尔坳陷区则保存相对完整(图3)。

2.2 早寒武世玉尔吐斯期深水缓坡

震旦纪末的柯坪运动虽然造成上震旦统地层遭受不同程度的剥蚀,但自南华纪形成的隆坳格局仍得以较好的保存,构成了早寒武世玉尔吐斯组沉积前古地貌。基于柯坪露头群的实测及星火1等12口钻井及地震同相轴特征,推测认为玉尔吐斯期具有深水缓坡的特征(图4)。内缓坡平面上主要分布在中央古陆带北缘、柯坪—温宿低隆周缘,以碎屑岩、砂质白云岩和暗色泥岩互层为主要特征,局部可见薄层颗粒滩,柯坪老砖厂等剖面可以作为典型剖面

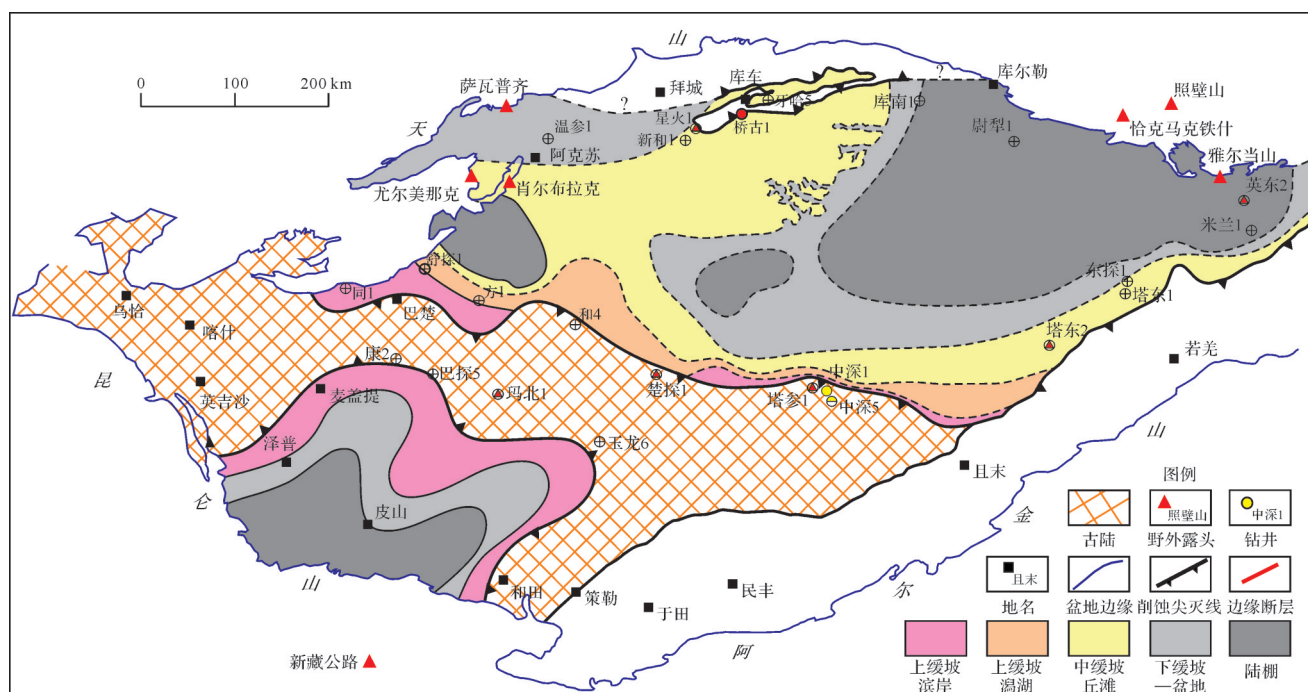


图2 塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组构造—岩相古地理图

Fig.2 Lithofacies paleogeographic map of the Qigebulake Formation (Upper Sinian) in Tarim Basin

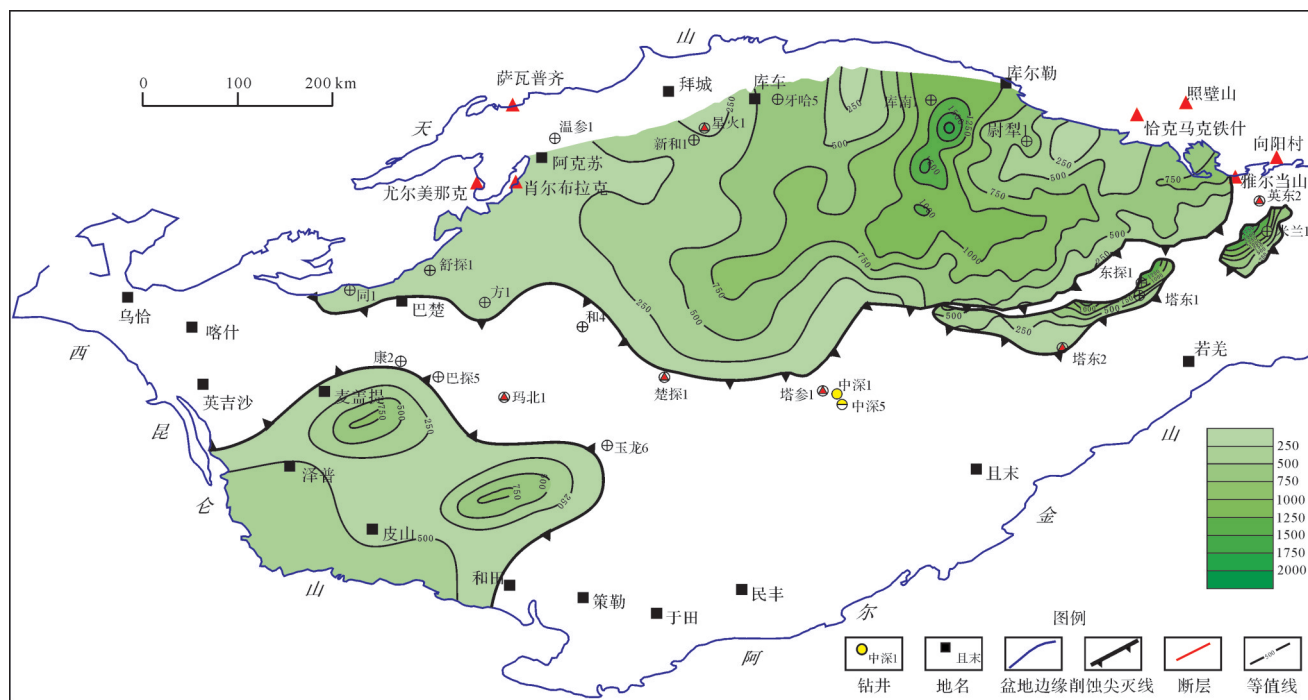


图3 塔里木盆地震旦系残余地层厚度等值图

Fig.3 Isopach map of the Sinian residual strata in Tarim Basin

点。中缓坡则以灰黑色泥页岩、泥质(瘤状)灰岩、泥质白云岩为主,垂向上整体表现为一个向上变浅序列,可以划分为富含硅质岩的下烃源岩段、薄层灰岩和云岩频繁互层的上烃源岩段及顶部白云岩段

(图5),苏盖特布拉克、肖尔布拉克、什艾日克等9个野外剖面点及星火1井均展现出这一特征,厚30~50 m,黑色泥页岩累计厚度10~15 m,局部受前寒武系裂陷继承性发育厚度明显增大。外缓坡—盆地则

主要分布在轮南—古城寒武系台缘带以东区域,塔东1和塔东2等井所揭示的硅质泥岩、硅质岩及黑色泥页岩正是代表了深海盆地相的基本特征。寒

武纪早期生命大爆发引发的菌藻类、浮游植物的繁盛为玉尔吐斯组有机质的富集提供了重要物质基础^[20-21]。

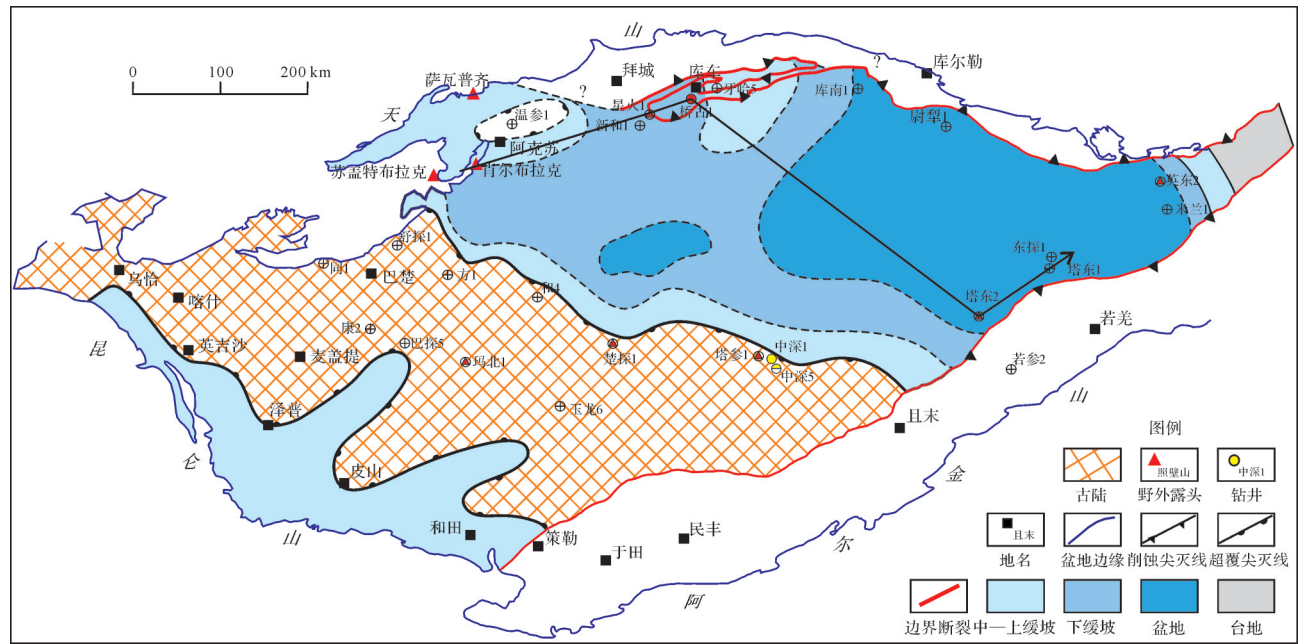


图4 塔里木盆地下寒武统玉尔吐斯组构造—岩相古地理图

Fig.4 Lithofacies paleographic map of Yuertusi Formation (Lower Cambrian) in Tarim Basin

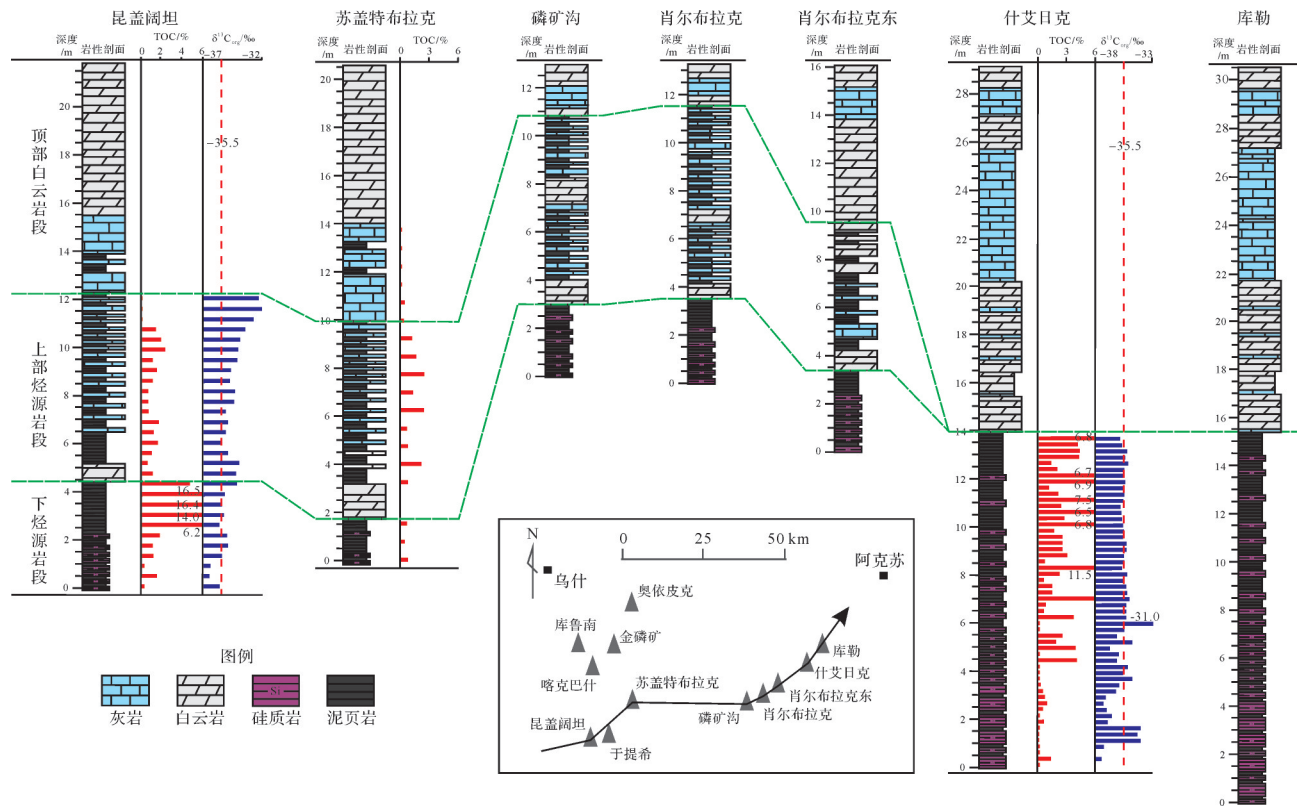


图5 柯坪野外露头区下寒武统玉尔吐斯组烃源岩对比剖面(据朱光有等^[20],重新编制)

Fig.5 Correlation section of the Yuertusi Formation using outcrops from the Keping area, Lower Cambrian (after Zhu *et al.*^[20], compiled)

2.3 早寒武世中晚期缓坡型—弱镶边型碳酸盐岩台地

早寒武世肖尔布拉克期,塔里木盆地发育了寒武系第一套浅水缓坡型碳酸盐岩台地(组合)。受玉尔吐斯期的“填平补齐”效应及局部断裂活化引起差异性沉降等影响,塔里木盆地隆—坳相间的古构造格局出现进一步的分异,即南部高隆带(图6,塔西南古隆)得以继续保持,稳定分布在和田—且末一带,延伸930 km,宽78~149 km;北部高隆带被拜城—新和台洼分隔为西侧柯坪—温宿低隆和东侧的轮南—牙哈低隆,长轴延伸分别为520 km和170 km。三个(低)隆起与其间低洼地貌单元共同构成了“三隆两洼”新沉积构造格局。随着海平面升降,肖下段→肖中段→肖上段依次超覆沉积于三个(低)古隆起之上。以塔西南古隆起周缘实钻井为例,位于古隆起之上的塔参1井、玉龙6井均缺乏下寒武统沉积,中寒武统直接覆盖在变质岩基底之上,紧邻古隆起的中深1、中深5井则仅发育39~41 m肖上段沉积,缺失肖中段及下段,而再向北靠近中部洼地的和4、方1等钻井则均发育完整的肖尔布拉克组沉积,地层厚度达200余米。古(低)隆起的平面展布特征控制了肖尔布拉克期缓坡型碳酸盐岩台地(组合)的古地理分异,自古隆起向北依次发育内缓坡混积坪、低能潮坪、中缓坡丘滩相、台内洼地、中缓坡外带及下缓坡—盆地等亚相带。依据缓坡类型及中缓坡丘滩带沉

积物差异,可划分出塔西南古隆北缘颗粒滩为主的坡坪式缓坡、柯坪—温宿低隆丘滩复合体均斜型缓坡及轮南—牙哈低隆丘滩复合体孤岛型缓坡。中缓坡丘滩相规模发育,主要分布在三个(低)古隆起周缘或之上,累计面积达 $9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。钻井已证实,古隆起围斜部位的中缓坡丘滩带是肖尔布拉克组规模有效储层发育的重要相带基础。

进入吾松格尔组沉积期,缓坡台地的格局未发生变化,海平面进一步下降,发育一套富泥质沉积,局部因水体局限发育小范围膏盐岩。与肖尔布拉克组典型的均斜型缓坡沉积相比而言,吾松格尔期已经开始由缓坡向弱镶边台地发展,轮南、古城等地区地震剖面均可观察到吾松格尔期弱镶边台缘的早期形态^[22]。

2.4 中寒武世蒸发潟湖主导的镶边型碳酸盐岩台地

中寒武世进一步继承了早寒武世南北分异的格局,受古(低)隆起幅度的进一步降低、海平面下降及干旱炎热的古气候,塔里木盆地整体表现为蒸发潟湖主导的镶边型碳酸盐岩台地沉积特征(图7)。中寒武统镶边型碳酸盐岩台地表现出两个值得注意的沉积现象,一是中寒武世台缘带呈现出明显的分异性:依据新和1井、英买36井等钻井及柯坪地区露头群揭示中寒武统台内蒸发潮坪直接覆盖在下寒武统中缓坡外带之上,可以合理推测北部台缘带至少向北推进

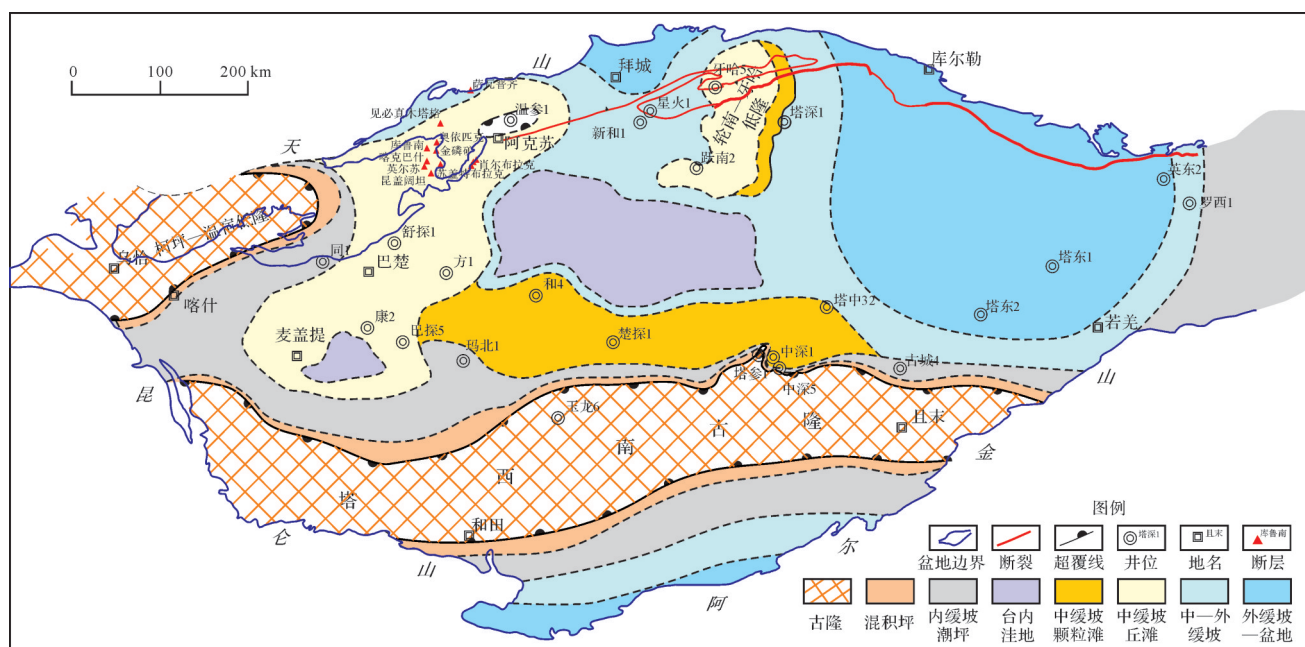


图6 塔里木盆地下寒武统肖尔布拉克组构造—岩相古地理图

Fig.6 Lithofacies paleogeographic map of the Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation, Tarim Basin

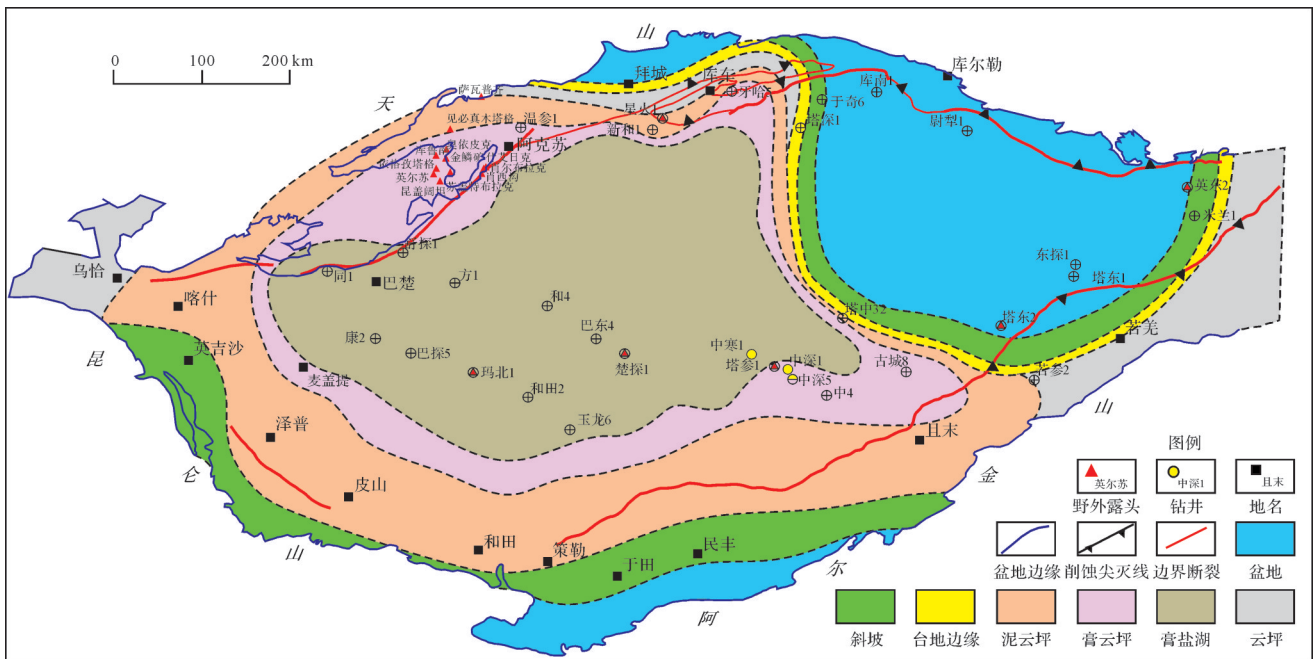


图7 塔里木盆地中寒武统构造—岩相古地理图

Fig.7 Lithofacies paleogeographic map of the Middle Cambrian strata, Tarim Basin

了30 km以上,为弱镶边—镶边型台地边缘;轮南—牙哈地区则进入了强进积强建隆的发育阶段,至少发育了2~3期地震资料可识别的台缘礁滩体;古城地区则受塔西南古隆起地貌影响未发育台缘带。二是台地内部表现为一大型蒸发台地,相带发育具明显分带性,即以膏盐湖为中心,向外依次发育膏盐湖→膏云坪+台内滩→泥云坪等亚(微)相带。利用实钻井及区域地震刻画结果,认为中寒武世台地发育规模连片膏盐湖,西至麦盖提—同1井区、东至塔中32井区、南至中深1井区,北边界至新和1井附近,面积超过 $14 \times 10^4 \text{ km}^2$,膏盐岩厚度400~700 m,周缘的膏云坪厚200~400 m,面积约 $5.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,构成一套封盖性能良好的区域直接盖层。值得注意的是,巴楚地区沙依里克组顶部发育一套6~63.6 m厚度不等的(云质)灰岩沉积,一方面说明中寒武统沉积期古气候干旱炎热,海侵期沉积的灰岩尚来不及白云岩化就被上覆厚层膏盐岩所覆盖保存;另一方面也说明此时的台地克拉通的性质更加明显,地貌更加平缓,至此始于前寒武系的台内裂陷发育形成“两隆夹一坳”古构造格局对台地的影响已经逐渐减弱消失。

3 构造—沉积演化过程与油气成藏组合

依据裂谷演化过程及岩相古地理响应特征,认

为寒武系盐下碳酸盐岩层系经历了震旦系同裂谷充填期→震旦纪末抬升剥蚀→早寒武世初海侵深水缓坡台地(裂后沉降期)→早寒武世中晚期缓坡台地(裂后沉降期)→中寒武世蒸发潟湖占主导镶边台地等5个重要阶段(图8)。

与全球典型裂谷盆地构造演化阶段相类似,随着基底断裂活动性减弱,塔里木板块在震旦纪进入同裂谷充填晚期演化阶段。震旦系地层主要分布在南华系裂谷沉降所形成的北部拗陷内,除后期抬升剥蚀区域外,分布稳定且下震旦统以滨海碎屑岩沉积为主,上震旦统则以碳酸盐岩沉积为主。晚震旦世这套碳酸盐岩沉积构成了寒武系盐下碳酸盐岩台地序列的雏形,推测以缓坡型碳酸盐岩台地为主。中缓坡发育了以微生物丘和颗粒滩为主的规模丘滩带,构成了上震旦统有效储层发育的物质基础。野外露头证据与钻井不断证实,晚震旦世中缓坡丘滩带主要分布在“两隆夹一坳”古构造格局的两隆之上,与四川盆地上震旦统灯影组台缘丘滩带展布特征有类似的特征。震旦纪末受柯坪运动(泛非运动)及全球海平面下降影响,塔里木板块受南北向挤压隆升,盆地现今中央隆起带(巴楚隆起—塔中隆起)及塔北隆起遭受剥蚀,造成中央隆起带、柯坪—温宿、轮台断隆等地区震旦系地层全部或部分缺失,寒武系地层直接超覆在前震旦系变质基底之上。柯坪

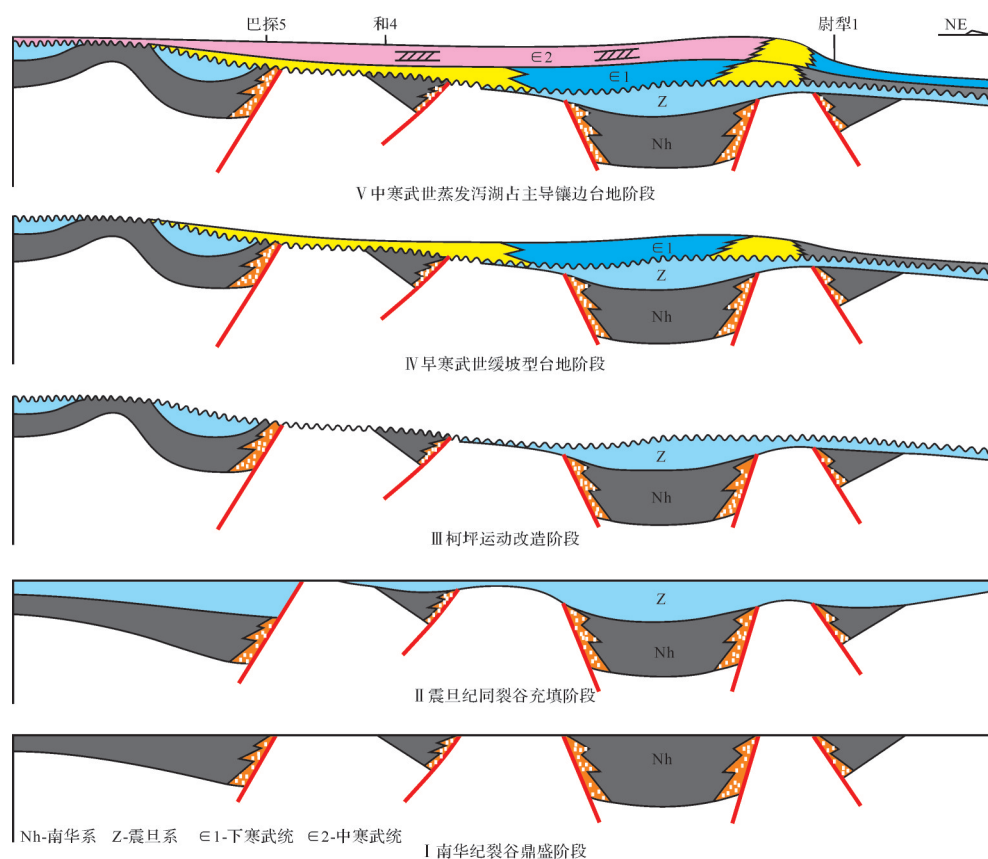


图8 塔里木盆地南华纪—中寒武世构造—沉积充填示意模式

Fig.8 Tectonic-sedimentary filling schematic model of Nanhua-Middle Cambrian in Tarim Basin

运动对塔里木板块产生了两个方面重要影响:1)垂直升降为主的构造活动方式使得“两隆夹一坳”古地理格局得以保持。南北向挤压迫使塔北地区发生基底隆升,北部隆起带进一步得到加强与分异,南部隆起带进一步演化为宽缓的大型隆起带,整体呈现出南高北底的宏观格局;2)上震旦统中缓坡丘滩带遭受剥蚀淋滤,形成了第1套有效储集层,以溶洞、原生孔隙(微生物格架孔、粒间孔、晶间孔等)及裂缝为主要储集空间。

早寒武世玉尔吐斯期全球性海泛将塔里木板块主体淹没,发育了一套黑色富有机质的泥页岩沉积,稳定分布在塔西南古隆起以北的坳陷区内及北部隆起带,另有最新报道塔西南地区也发现了一套疑似同期黑色泥页岩沉积,与四川盆地筇竹寺烃源岩层位相当,构成塔里木盆地寒武系盐下碳酸盐岩层系油气成藏体系中的主力烃源岩。塔中隆起中深1C井并获得日产 $15.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 工业气流及少量凝析油,充分证实玉尔吐斯组烃源岩不仅能够有效供烃,而且具有规模效应。

经过玉尔吐斯期填平补齐,古地貌变得更加平缓,构造沉降速率持续降低及海平面逐渐下降,塔里木盆地进入微生物岩与颗粒滩占主导的浅水缓坡型碳酸盐岩台地发育阶段。构造格局也出现了进一步的分异,南部高隆带(塔西南隆起)和北部高隆带的柯坪—温宿低凸起、轮南低凸起,与中部坳陷及东部盆地共同构成了“三隆两洼”岩相古地理格局,肖尔布拉克组沉积依次超覆于南北两古隆起带之上,向南尖灭于塔西南古隆起,向柯坪—温宿低凸起带逐渐减薄。至肖尔布拉克组沉积中晚期,南北两古隆起周缘发育了面积超过 $9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的中缓坡丘滩带,其中北部隆起带以丘滩复合体为主,南部隆起带以颗粒滩为主。在早期白云岩化及大气淡水淋滤作用下,主要分布于肖上段的中缓坡丘滩带形成了第2套有效储层,储集空间以藻格架溶孔—孔洞、粒内(间)孔为主,孔隙度4.5%~12.0%,厚约45 m。

至中寒武世,“两隆夹一坳”的古构造格局对岩相古地理分异的控制逐渐减弱,干旱炎热的古气候及台缘带丘滩建隆快速发育是该阶段沉积的主要控

制因素。南北两隆起带之间的低洼区被蒸发潟湖所占据,发育了的巨厚膏盐岩。中寒武统膏盐岩具厚度大、分布面积广及封盖能力强的特征,构成了盐下台地序列中1套优质的直接区域盖层。

塔里木盆地晚震旦世至中寒武世构造沉积演化控制了一套主力烃源岩、两套规模有效储层及一套区域盖层的发育,构成了两套有效成藏组合,即下组合(图9)和上组合。下组合为下寒武统玉尔吐斯组烃源岩覆盖于上震旦统中缓坡丘滩相白云岩储层之上,玉尔吐斯组既构成有效烃源岩又起到直接封盖的作用。上组合则是玉尔吐斯组供烃,下寒武统肖尔布拉克组为主力储层段,上覆中寒武统膏盐岩盖层。

4 油气勘探前景

4.1 四川盆地德阳—安岳特大型气田勘探启示

四川盆地晚震旦世一早寒武世天然气勘探近年来获得重大突破,在川中古隆起构造低部位高石一磨溪地区发现了储量超万亿方的安岳特大型气藏。气藏解剖表明^[23-24],安岳特大型气藏的关键油气成藏条件与德阳—安岳克拉通内裂陷的发育及演化关系密切。德阳—安岳裂陷由川西海盆向川中、蜀南呈北西西向延伸,宽度 50~300 km,南北长 320 km,盆地范围内面积达 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$,是一个区域拉张背景下

受同沉积断裂控制的台内裂陷。先后经历了形成期、发育期及消亡期3个主要演化阶段,各演化阶段对安岳特大型气藏发育所必须的烃源灶、规模有效储层、区域盖层等石油地质要素的发育起到关键控制作用。

以德阳—安岳裂陷为核心,自晚震旦世至早寒武世中晚期形成了两套源—储—盖组合,且在这两套油气成藏组合中均获得重大发现,如在以灯影组台缘带为主要储集层的第一套成藏组合整体控制储量 $5\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,台缘带控制含气面积 $1\,500 \text{ km}^2$ 。无论是对基础石油地质条件的控制还是后期勘探实践发现,均表明德阳—安岳裂陷槽相关的古裂陷、古隆起、古丘滩等对气藏的聚集成藏起到重要的控制,为塔里木盆地盐下油气勘探提供了重要借鉴。

4.2 相似的沉积演化序列及石油地质要素

与四川盆地晚震旦世一早寒武世发育的德阳—安岳克拉通内裂陷构造相比而言,塔里木盆地寒武系盐下无论在沉积充填序列还是关键油气成藏条件形成及配置组合方面均具有良好的相似性(表1)。受南华纪初开始的罗迪尼亚超大陆裂解影响,位于相同古纬度的扬子板块与塔里木板块均发育了大规模台内裂陷,先后经历了裂陷形成期、发育期及消亡期,控制了各自岩相古地理的发育及演化。如前文所讨论,塔里木盆地自晚震旦世台地形成开始,先后经历了晚震旦世同裂谷充填阶段→震旦纪末抬升剥

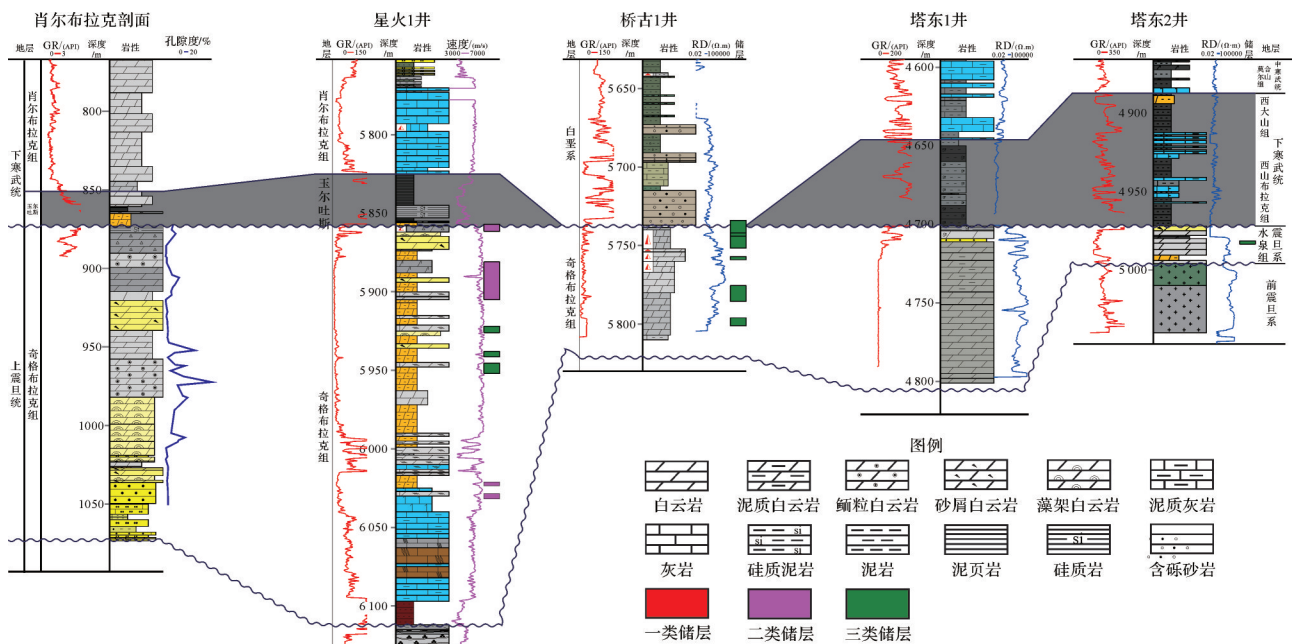


图9 下油气成藏组合钻井对比剖面(剖面位置见图4)

Fig.9 Well correlation section of lower hydrocarbon assemblage in Tarim Basin (profile location, see Fig.4)

表1 四川盆地与塔里木盆地晚震旦世—早寒武世石油地质要素对比表

Table1 Comparison between Sichuan Basin and Tarim Basin petroleum geological background and elements through the Later Sinian to the Early Cambrian

地质要素	四川盆地	塔里木盆地
台内裂陷	晚震旦世灯影期发育德阳—安岳台内裂陷,面积6×10 ⁴ km ²	晚震旦世仍存在南华纪开始发育的阿满裂陷和昆仑山前裂陷 ^[3] ,总面积超过14.8×10 ⁴ km ²
构造运动	桐湾运动导致灯影组地层被剥蚀,最强烈地区可剥至灯二段	中央隆起带及北部柯坪—温宿、轮台断隆等强烈剥蚀,裂陷区域与周缘有残留,分布较广
海平面变化与台地演化	早寒武世初海泛,台地被淹没,形成全盆地分布的筇竹寺组优质烃源岩	早寒武世初海泛,台地被淹没,形成全盆地分布的玉尔吐斯组优质烃源岩
储集层	裂陷周缘灯影组微生物白云岩储层、早寒武世缓坡台地龙王庙组滩相白云岩储层	裂陷充填间歇期晚震旦世微生物—颗粒滩白云岩储层及早寒武世肖尔布拉克组丘滩相白云岩储层
烃源岩	裂陷内发育麦地坪组烃源岩,上覆海泛期筇竹寺烃源岩	裂陷内南华系—震旦系潜在烃源岩,上覆玉尔吐斯组烃源岩
盖层	下寒武统筇竹寺组烃源岩构成灯影组气藏的盖层,高台组+洗象池组膏盐层构成龙王庙气藏的盖层	下寒武统玉尔吐斯组烃源岩构成上震旦统气藏的盖层,中下寒武统膏盐构成肖尔布拉克组气藏的区域盖层
圈闭	地层—岩性圈闭为主,构造高部位有利于油气富集	地层—岩性圈闭为主,构造高部位有利于油气富集
成藏组合	灯影组气藏(旁生侧储、下生上储),龙王庙组气藏(下生上储)	与四川盆地相类似的两套成藏组合

蚀→早寒武世初深水缓坡台地→早寒武世缓坡台地→中寒武世蒸发潟湖主导镶边台地5个重要演化阶段,与四川盆地德阳—安岳裂陷形成期、发育期及消亡期有着——对应的关系。震旦纪末,塔里木盆地整体遭受柯坪运动引起的抬升剥蚀,较好保留了“两隆夹一坳”沉积格局的同时,也对上震旦统中缓坡丘滩带产生了重要的改造作用。柯坪运动发生的同时,四川盆地也整体遭受了桐湾运动Ⅱ幕的剥蚀改造,使得裂陷槽周缘上震旦统灯影组微生物岩碳酸盐岩地层受到强烈同生岩溶改造。随着早寒武世早期全球性海泛的开始,发育了一套与四川筇竹寺层位相当的玉尔吐斯组烃源岩。四川盆地筇竹寺烃源岩的分布明显受控于沉积前地貌特征,裂陷槽内烃源岩厚度、生烃强度等指标均明显大于相邻区域。重新评价灯影组、龙王庙组天然气资源结果表明,资源总量达4.1~5.0×10¹³ m³,台内裂陷贡献资源量2.92~3.11×10¹³ m³,占比高达62%。而玉尔吐斯组分布面积高达22×10⁴ km²,厚度10~15 m,局部更是可达30~50 m,规模更是十分可观。而且地球化学指标对比表明,玉尔吐斯组明显优于筇竹寺组烃源岩,TOC值达4%~16%,是筇竹寺组的2~3倍,被认为中国发现的最优质海相泥质烃源岩。随后塔里木盆地与四川盆地均发育了一套缓坡型碳酸盐岩台地沉积,即肖尔布拉克组、龙王庙组,为规模优质储层发育提供了重要物质基础。台地演化中后期,发育了覆盖全台地的蒸发潟湖沉积,构成了一套区域分布优质直接

盖层,封盖能力明显优于四川盆地同期发育的高台组、洗象池组泥质岩及蒸发膏盐。

4.3 两套受台内裂陷影响的规模有效储层

储层作为最重要的油气成藏条件之一,其规模性及质量直接关系到油气聚集规模与丰度。塔里木盆地发育了两套与台内裂陷构造演化相关规模有效储层,与四川盆地德阳—安岳裂陷相伴生发育的两套主力储层无论在储层特征还是主控因素上均具有良好相似性。第一套储层是形成于晚震旦世裂后坳陷期分布于南北两高隆带的微生物岩和颗粒滩占主体的中缓坡丘滩带储层,面积达26 500 km²,与四川盆地灯四段微生物丘滩体储层特征和成因均可对比。储集岩性以微生物格架白云岩、颗粒白云岩及结晶白云岩为主,叠层石较为常见。储集空间以溶蚀孔洞、晶间孔隙、微生物岩相关孔隙及裂缝为主,多为原生孔隙、早表生组构选择性溶孔及晚表生溶蚀孔洞组合。微生物丘滩复合体构成为储层发育重要物质基础,与四川盆地桐湾运动Ⅱ幕(柯坪运动)相当的表生溶蚀作用使储层物性得到进一步的改善。“两隆夹一坳”的古地貌经玉尔吐斯期的填平补齐后变得更加平缓,发育了肖尔布拉克组碳酸盐岩缓坡泛丘滩储层,面积达9×10⁴ km²。与四川盆地龙王庙组颗粒滩白云岩储层特征相类似,储集岩性以(藻)砂屑滩白云岩、颗粒白云岩、微生物白云岩、结晶白云岩等为主,有效储集空间以粒间溶孔、晶间溶孔、藻格架孔等为主。储层成因研究表明,台内丘滩

相沉积和频繁海平面升降相关的早表生溶蚀作用是肖尔布拉克组白云岩储层发育主因^[25-26],这与龙王庙组颗粒滩储层的发育机理相似,相控特征明显。

进一步比较两套有效储层表明,肖尔布拉克组泛滥储层在规模、质量上均优于上震旦统中缓坡丘滩带储层。实钻井已证实肖尔布拉克组中缓坡丘滩带储层分布面积为上震旦统储层2~3倍、厚度更大,平均储地比达39.6%。这与经过柯坪运动剥蚀夷平、玉尔吐斯组进一步填平补齐作用所形成的宽缓古地貌密切相关,而目前对震旦系储层规模及厚度数据主要来自于野外露头,覆盖区发育情况仍需进一步评价。储层评价结果表明肖尔布拉克组储层以孔隙—孔洞为主的Ⅰ、Ⅱ储层,而震旦系优质储层主要发育于有利相带叠合表层风化壳位置,受后期多期次成岩改造,以中低孔—低渗为特征的Ⅲ类为主。

5 结论与认识

(1) 塔里木盆地寒武系盐下碳酸盐岩层系的发育始于晚震旦世同裂谷期碳酸盐岩缓坡,先后经历了震旦纪末剥蚀夷平、早寒武世深水缓坡与缓坡型碳酸盐岩台地及中寒武世蒸发潟湖主导的镶边型碳酸盐岩台地等5个构造—沉积演化阶段。形成于南华纪初期“两隆夹一坳”古构造格局对沉积充填演化的控制贯穿始终,控制了一套主力烃源岩、两套有效储层及两套有效盖层的发育,构成了上、下两套油气成藏组合。

(2) 与已获得重大突破的四川德阳—安岳裂陷槽沉积演化序列及油气成藏组合对比表明,二者具有良好的相似性,而且烃源岩品质、直接盖层的封盖性均优于安岳特大型油气藏。这将更加坚定塔里木盆地盐下油气勘探信心。

(3) 下寒武统玉尔吐斯组烃源岩广布于塔西南隆起以北地区,面积超过 $22 \times 10^4 \text{ km}^2$,黑色泥页岩厚度10~15 m,局部超过30 m,且TOC值最大可达16%,能够充分保障了寒武系盐下两套油气成藏组合烃源供给。结合两套储层品质对比结果,由玉尔吐斯组烃源岩—肖尔布拉克组中缓坡丘滩带储层—中寒武统膏盐岩构成的上组合更具勘探现实性。

参考文献(References)

[1] 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油气藏的发现与勘探意义[J]. 中国石油勘探,

2014, 19(2): 1-13. [Wang Zhaoming, Xie Huiwen, Chen Yongquan, et al. Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 well in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(2): 1-13.]

[2] 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 Jinhu, Pan Wenqing. 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.]

[3] Jiang L, Cai C F, Worden R H, et al. Multiphase dolomitization of deeply buried Cambrian petroleum reservoirs, Tarim Basin, north-west China[J]. Sedimentology, 2016, 63(7): 2130-2157.

[4] 郭峰,郭岭. 柯坪地区肖尔布拉克寒武系层序及沉积演化[J]. 地层学杂志, 2011, 35(2): 164-171. [Guo Feng, Guo Ling. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution of the Cambrian system at the Xiaoerblak section in the Keping area[J]. Journal of Stratigraphy, 2011, 35(2): 164-171.]

[5] 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.]

[6] 杜金虎,邹才能,徐春春,等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 268-277. [Du Jinhu, Zou Caineng, Xu Chunchun, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 268-277.]

[7] 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 Jinhu, 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.]

[8] 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 Changsong, Li Sitian, Liu Jingyan, 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.]

[9] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京:石油工业出版社, 1997: 1-200. [Jia Chengzao. Tectonic characteristics and petroleum Tarim Basin China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 1-200.]

[10] 翟明国. 中国主要古陆与联合大陆的形成—综述与展望[J].

- 中国科学(D辑):地球科学,2013,43(10):1583-1606. [Zhai Mingguo. The main old lands in China and assembly of Chinese unified continent[J]. Science China(Seri. D): Earth Sciences, 2013, 43(10): 1583-1606.]
- [11] 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.]
- [12] 邹亚锐,塔吉古丽,邢作云,等. 塔里木新元古代—古生代沉积盆地演化[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2014,39(8):1200-1216. [Zou Yarui, Ta Jiguli, Xing Zuoyun, et al. Evolution of sedimentary basins in Tarim during Neoproterozoic-Paleozoic[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(8): 1200-1216.]
- [13] 夏林圻,张国伟,夏祖春,等. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束:来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据[J]. 地质通报,2002,21(2):55-62. [Xia Linqi, Zhang Guowei, Xia Zuchun, et al. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic oceanic basin: Evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(2): 55-62.]
- [14] 崔海峰,田雷,张年春,等. 塔西南坳陷南华纪—震旦纪裂谷分布及其与下寒武统烃源岩的关系[J]. 石油学报,2016,37(4):430-438. [Cui Haifeng, Tian Lei, Zhang Nianchun, et al. Nanhua-Sinian rift distribution and its relationship with the development of Lower Cambrian source rocks in the southwest depression of Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(4): 430-438.]
- [15] 高林志,郭宪璞,丁孝忠,等. 中国塔里木板块南华纪成冰事件及其地层对比[J]. 地球学报,2013,34(1):39-57. [Gao Linzhi, Guo Xianpu, Ding Xiaozhong, et al. Nanhua glaciation event and its stratigraphic correlation in Tarim Plate, China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2013, 34(1): 39-57.]
- [16] 刘伟,张光亚,潘文庆,等. 塔里木地区寒武纪岩相古地理及沉积演化[J]. 古地理学报,2011,13(5):529-538. [Liu Wei, Zhang Guangya, Pan Wenqing, et al. Lithofacies palaeogeography and sedimentary evolution of the Cambrian in Tarim area[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(5): 529-538.]
- [17] 何金有,贾承造,邬光辉,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 Jinyou, Jia Chengzao, Wu Guanghui, et al. Characteristics and model of Sinian weathering paleo-karst in Aksu area, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8): 2513-2518.]
- [18] 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一寒武统为例[J]. 石油学报,2015,36(9):1074-1089. [Li Pengwei, Luo Ping, Song Jinmin, 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.]
- [19] 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 Xiaolin, Hu Wenxuan, Chen Qi, et al. Characteristics and formation mechanism of Upper Sinian algal dolomite at the Kalpin area, Tarim Basin, NW China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(10): 1479-1494.]
- [20] 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 Guangyou, Chen Feiran, Chen Zhiyong, et al. Discovery and basic characteristics of the high-quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 8-21.]
- [21] 刘文汇,胡广,腾格尔,等. 早古生代烃源形成的生物组合及其意义[J]. 石油与天然气地质,2016,37(5):617-626. [Liu Wenhui, Hu Guang, Tenger, et al. Organism assemblages in the Paleozoic source rocks and their implications[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 617-626.]
- [22] 熊益学,陈永权,关保珠,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 Yixue, Chen Yongquan, Guan Baozhu, et al. Distribution of northern platform margin and implications to favorable exploration regions on Lower Cambrian Xiaorbulake Formation, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(2): 408-415.]
- [23] 魏国齐,杜金虎,徐春春,等. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系—寒武系大型气藏特征与聚集模式[J]. 石油学报,2015,36(1):1-12. [Wei Guoqi, Du Jinhui, Xu Chunchun, et al. Characteristics and accumulation modes of large gas reservoirs in Sinian-Cambrian of Gaoshiti-Moxi region, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 1-12.]
- [24] 许海龙,魏国齐,贾承造,等. 乐山—龙女寺古隆起构造演化及对震旦系成藏的控制[J]. 石油勘探与开发,2012,39(4):406-416. [Xu Hailong, Wei Guoqi, Jia Chengzao, et al. Tectonic evolution of the Leshan-Longnusi paleo-uplift and its control on gas accumulation in the Sinian Strata, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 406-416.]
- [25] 郑剑锋,沈安江,刘永福,等. 多参数综合识别塔里木盆地古生界白云岩成因[J]. 石油学报,2012,33(增刊2):145-153. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Multi-parameter comprehensive identification of the genesis of Lower Paleozoic dolomite in Tarim Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(Suppl. 2): 145-153.]
- [26] 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.]

Tectonic-sedimentary Filling History through the Later Sinian to the Mid-Cambrian in Tarim Basin and Its Explorational Potential

ZHU YongJin^{1,2,3}, SHEN AnJiang^{1,2}, LIU LingLi¹, CHEN YongQuan⁴, YU Guang^{1,3}

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

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

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

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

Abstract: Tarim block evolved into a strong stretching stage affected by the Rodinia supercontinent cracking in the early Nanhua Period. The inter-platform rift system, oriented Northeast-Southwest, developed a “Two Uplifts and One Depression” tectonic framework with north and south high belts. The sedimentary filling sequence, evolution, and hydrocarbon accumulation in the Late Sinian to the Middle Cambrian carbonate platform is obviously affected by this tectonic framework. In this study, the carbonate sedimentary sequence underlying Mid-Cambrian Evaporite and controlled by the Pre-Cambrian rift tectonic-sedimentary evolution was considered to be an integral unit. This unit has experienced five evolution stages, including the Late Sinian carbonate ramp platform, denudation across the Sinian-Cambrian boundary, Early Cambrian deep-water muddy ramp and shallow-water carbonate ramp, and Mid-Cambrian evaporate lagoon dominated rimmed platform. High quality hydrocarbon source rocks in the Yuertusi Formation, an Upper Sinian and Lower Cambrian carbonate ramp mound-shoal facies dolomite reservoir, and Middle Cambrian evaporite caprock developed during the tectonic-sedimentary filling process and contains two sets of an effective accumulation combination. We propose that this dolomite sequence underlying the Mid-Cambrian resembles the Deyang-Anyue area in the Sichuan Basin, SW China, which has similar tectonic-sedimentary filling sequence and hydrocarbon accumulation assemblages. The quality of hydrocarbon source rock and direct cap rock is better than that of the Deayang-Anyue giant gas field, and the upper accumulation combination is of great realistic explorational potential.

Key words: tectonic-sedimentary response; hydrocarbon accumulation assemblage; explorational potential; Late Sinian to Mid-Cambrian; Tarim Basin