

多资料约束下的塔里木盆地寒武系 层序地层划分与对比

王坤¹, 刘伟¹, 黄擎宇¹, 石书缘¹, 王平², 张艳秋²

(1 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院; 2 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司)

摘要 塔里木盆地寒武系露头分布局限、钻井数量少,给开展盆地尺度的层序地层学研究带来困难。以肖尔布拉克露头为基础,根据岩相发育特征及叠置样式完成了寒武系层序地层格架的建立。寒武系共发育8个Ⅲ级层序,18个Ⅳ级层序。井下录井岩性剖面精度低,难以满足层序划分的要求,基于Fisher判别分析,综合利用岩心及测井资料完成岩性识别;利用GR曲线的最大熵谱分析完成对泥质含量变化趋势的识别;利用地震资料上可识别的削截特征进行层序界面的识别。在多资料的综合约束下完成了井下层序划分。利用贯穿盆地东西向和南北向两条剖面上具有代表性的10口钻井和1个露头剖面的资料,完成了台—盆尺度的高频层序对比,分析了等时格架下的地层沉积样式与岩相变化特征。认为总体上寒武纪地层由早至晚沉积速率逐渐增大,沉积中心向盆地方向迁移。层序类型不同,储层发育特征亦不同,层序界面处常发育优质储层。

关键词 塔里木盆地; 寒武系; 层序地层; 层序对比; 岩相; 储层

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

1 概况

层序地层学作为一门应用性很强的学科,在油气地质综合研究和油气勘探中发挥着重要的作用^[1-3]。目前,我国海相碳酸盐岩的层序地层划分存在以下难点:(1)地层划分存在等时异相问题,而不同地层分区内的岩石地层单元名称不同,增加了层序划分的难度;(2)海相碳酸盐岩层序地层学研究的工业化应用不及碎屑岩的普遍,对碳酸盐岩岩相及储层空间展布的预测效果不及碎屑岩;(3)海相层序的划分缺少标准,导致不同学者对同一地区同一层系的划分方案不一致。以塔里木盆地寒武系层序地层研究为例:台地区和盆地区的岩石地层单元不同,需要结合年代地层单元来对层序界面进行厘定,而寒武系的露头区较少,导致区域上的、台(地)—盆(地)尺度下的层序地层对比难度加大,加之碳酸盐岩的非均质性,使得层序地层对比的应用受到约束。前人曾多次对塔里木盆地寒武系的层序地层格架进行过划分^[4-9],但多集中在露头区,尚未开展有效的台—盆

尺度下的高频层序对比研究。而区域性层序地层的研究,是要搞清楚岩相在横向和纵向上的展布,以及预测储集体的内在联系。因此,台—盆尺度下的层序对比,如果可以细化到高频层序的尺度,则可以有效确定沉积体系的时空演化,并能解决储层的不均一性问题。

塔里木盆地寒武系目前是盆地最下部的一套含油气层系,具有埋藏深度大、沉积成岩过程复杂、钻井少、勘探程度低的特点^[10-13]。前人研究认为塔里木盆地寒武纪的沉积格局划分是以两条台缘带为界,自西向东依次为塔西台地、塔东盆地和罗西台地^[14-15](图1)。其中塔西台地寒武系或与震旦系齐格布拉克组不整合相接,或直接上覆于前震旦纪基底。寒武系自下而上依次发育玉尔吐斯组、肖尔布拉克组、吾松格尔组、沙依里克组、阿瓦塔格组和丘里塔格组。按照国际地层委员会2013年确定的年代地层标准,寒武系共分四统十阶,与中国地层委员会2001年制定的标准(三统十阶)存在差异(图2)。不同学者基于不同的资料对寒武系层序的划分亦存在差异。

收稿日期: 2015-02-16; 改回日期: 2015-09-14

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”的子课题“四川、塔里木等盆地及邻区海相碳酸盐岩大油气田形成条件、关键技术及目标评价”(编号 2011ZX05004-001)资助

王坤: 1985年生,博士。主要从事油气地质综合研究工作。通讯地址: 100083 北京市海淀区学院路20号910信箱地质所; E-mail: wangkuntoby@163.com

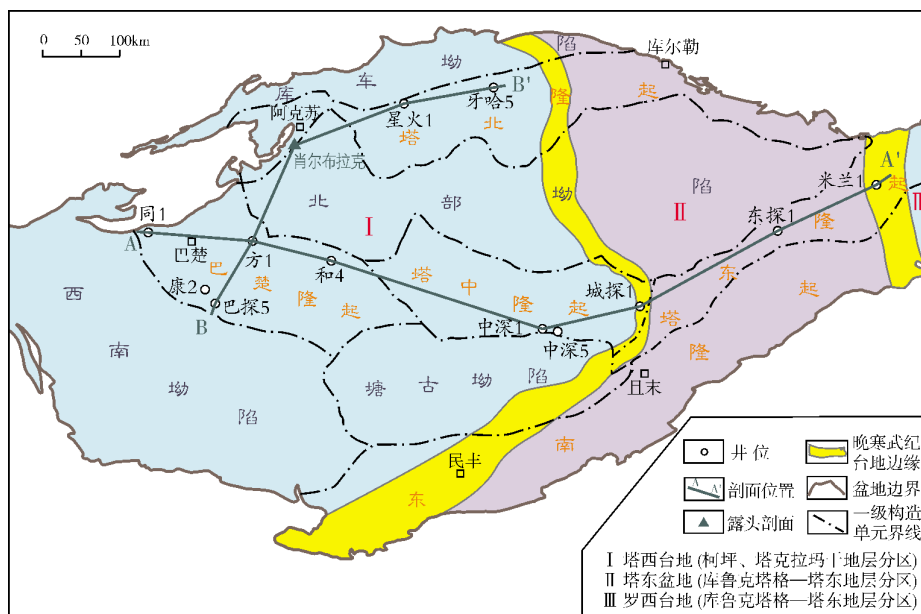


图1 塔里木盆地构造区划及寒武纪古地理格局(岩相古地理格局据文献[15]修改)

A—A'和B—B'剖面见图5

本文以塔里木盆地寒武系为例,细化了地层的横向展布模式,利用野外露头、岩心、测井、地震等多种资料讨论了层序的发育特征和识别标准,并在台—盆尺度上进行了层序的对比。基于笔者所掌握的资料和认识,本文建立的寒武系层序地层格架与前人的研究存在差别(图2)。依据层序对比结果,对膏盐岩、碳酸盐岩的时空展布和储层发育特征进行了分析,以期对后续研究和油气勘探工作有所裨益。

2 寒武系岩相发育特征

沉积学研究是层序划分对比的基础工作,对于掌握区域沉积背景和岩相变化规律十分关键^[16-17]。岩相(lithofacies),作为国外学者经常使用的术语体系^[16-19],笔者认为它可以同时反映岩石组构特征与沉积环境,故本文的沉积学研究将据此来进行。根据露头、岩心的岩石学特征,以薄片分析为手段,对寒武系的岩相进行了识别,共划分出8种对沉积环境有指示意义的岩相(另有侵入岩相本文不作讨论)。

深水岩相 主要包括黑色泥岩以及硅质岩,主要分布于下寒武统玉尔吐斯组(星火1井、肖尔布拉克剖面)及西大山组(东探1井)。黑色泥岩页理构造发育,可见硅质斑点。硅质岩灰黑色,块状构造,代表了深水沉积环境。结合早寒武世岩相古地理背景,推测该岩相的沉积水体深度可大于200 m。

结晶白云岩 分布较为普遍,见于各层段(图3a)。其中泥晶白云岩见泥质条带和星点分布的膏质斑块及小型泥裂,岩性相对致密,岩石颜色从深灰色到褐色不等,表明其沉积时既有水下低能环境,又有间歇性暴露环境。泥晶白云岩镜下观察可见水平层理或波状层理、示底构造等,陆源碎屑成条带状分布,未见生物化石,偶见膏模孔,沉积环境包括潮下低能带、台内洼地以及潮间带。从粉晶白云岩开始,岩心可见溶蚀孔洞,0.5~20 mm不等。洞壁可见鞍状白云石、自生石英半充填。镜下可见晶间孔、晶间溶孔,整体上晶型越粗大,孔隙发育越好。部分样品存在过度白云石化导致的孔隙充填现象,见成岩流体导致的硅化现象。多期的成岩改造及白云石化作用使得原岩结构难以识别,增加了沉积环境识别的难度。根据前人对本区白云石化作用的认识^[10-15],推测粉晶以上的结晶白云岩的沉积环境包括潟湖、潮下高能带。

膏质(含膏)白云岩相 膏质常呈斑块状分布,膏质含量低时呈斑点状散布于基质中,基质以泥—粉晶为主(图3b)。镜下见石膏呈斑状嵌于基质中,部分石膏被溶蚀形成膏模孔。另可见裂缝充填型石膏,晶型粗大,产状明显区别于沉积型石膏,应属成岩型石膏。石膏的出现表明水体的循环变弱,盐度增加,推测环境为局限台地内的潟湖,膏岩含量增加代表潟湖的蒸发强度增加。

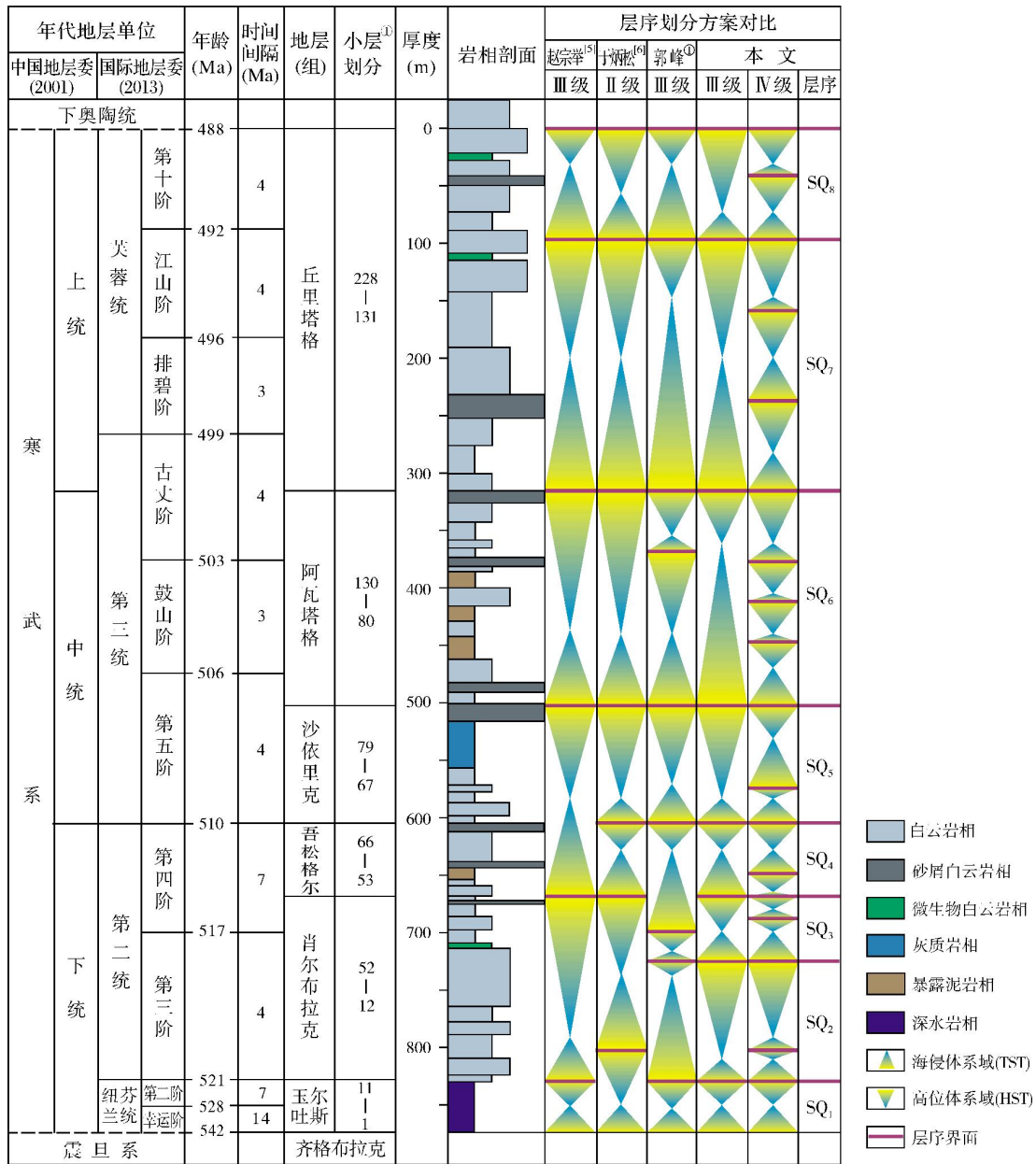


图2 塔里木盆地肖尔布拉克剖面寒武系地层剖面及层序划分方案对比

砂屑白云岩相 多见于中上寒武统(图 3c)。镜下可见颗粒结构,砂屑粒径 0.2~1.8mm。砂屑间为亮晶白云石胶结,半自形或他形。粒间孔十分发育,亦可见粒内溶孔。和 4 井在砂屑白云岩中见到 50 μm 的泥晶套,呈暗色条带位于砂屑外缘。而其他样品或因强烈的白云石化作用导致大部分沉积成岩特征丢失,泥晶套并不普遍。泥晶套的出现表明浅层

透光带内具有较高的营养水平,微生物繁育。该类岩相沉积时水体能量强,水流的簸选作用将灰泥淘洗干净,原始孔隙度较高,沉积环境主要为台内滩、潮下高能带。

灰质岩相 主要包括石灰岩、含白云质灰岩以及白云质灰岩(图 3d),可见泥质纹层,灰色—深灰色为主。岩心观察及镜下观察,可见溶蚀孔洞发育,

① 郭峰. 新疆阿克苏肖尔布拉克寒武系剖面[R]. 中国石油塔里木油田公司,2008.

中寒武统沙依里克组中最为发育。通常认为沙依里克组的灰质岩相沉积是海侵范围达到最大时的表现,从肖尔布拉克剖面到和4井,该段沉积厚度稳定。沉积环境为水体较深的低能开阔台地。

膏盐岩相 主要包括泥质膏盐岩、白云质膏盐岩(图3e)。岩石塑性强,岩心观察多具有揉皱现象,破碎,夹暗色泥晶白云质条带。镜下可见石膏晶体呈板状和他形,孔隙不发育。盐岩呈无色透明状,水溶性强。膏盐岩可形成于蒸发潟湖环境和潮上萨布哈环境,前者的颜色以灰白色为主,而后者多具有暴露氧化条件下的褐色、红褐色。

暴露泥岩相 在下寒武统吾松格尔组和中寒武统阿瓦塔格组中最为发育,颜色褐色、红褐色。该类

岩相的钻井取心较少,在露头区泥岩段风化作用强烈,可见陆源碎屑富集的纹层。该类泥岩相在录井上易与碳酸盐岩区分,在GR曲线上也有特征的响应。该类岩相的发育代表了浅水暴露环境,沉积环境包括潮上带、潮间带上部,陆源碎屑含量增加表明沉积环境更靠近陆地。

微生物白云岩相 作为典型的生物成因的白云岩(图3f),其发育的前提是沉积环境适宜生物的繁茂。在下寒武统及上寒武统均见到了该类岩相。镜下可见藻黏结结构,窗格孔发育,亮晶胶结。微生物主要发育在海水的透光带,特别是水深小于20m的地带。因此,该类岩相代表了潮间带下部至潮下带上部水动力相对较高的环境。

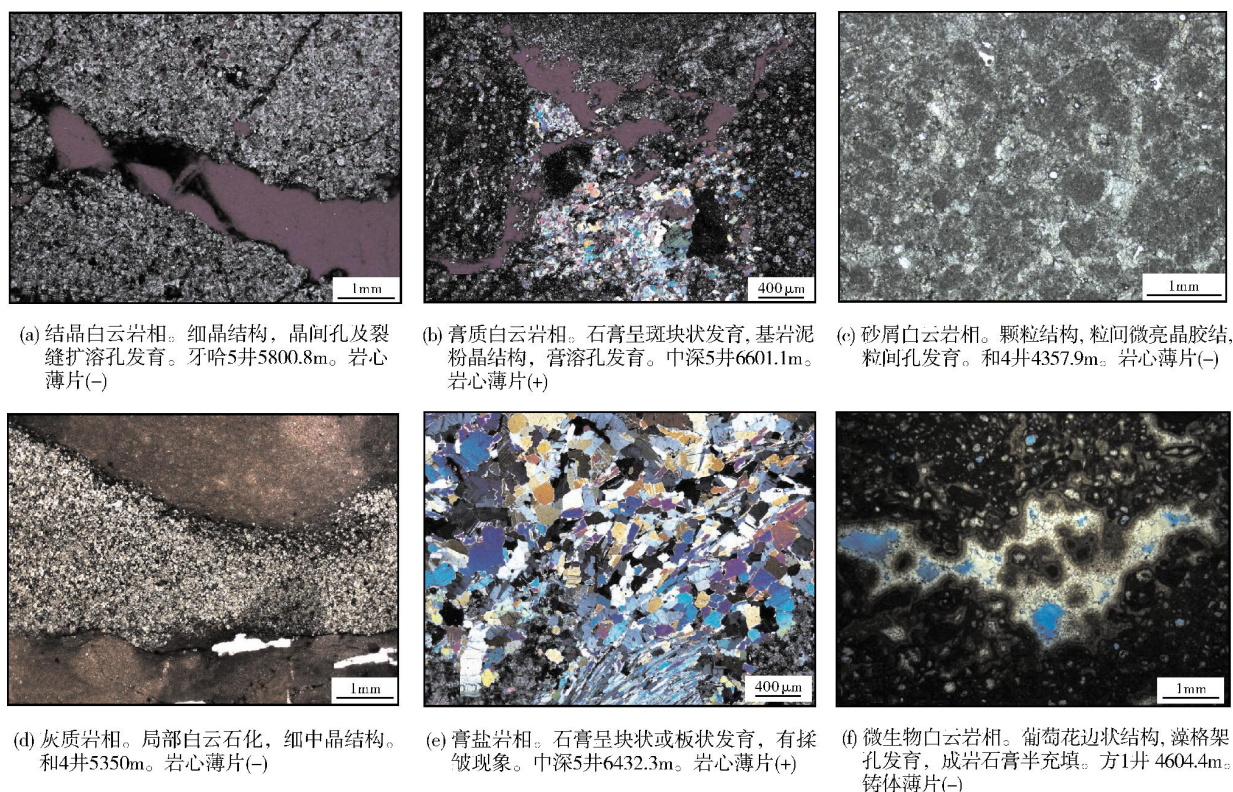


图3 塔里木盆地寒武系沉积岩相发育类型

3 古构造背景

自震旦纪早期开始,古塔里木板块发生裂解,在古塔里木板块的边缘和内部发育了大陆裂谷盆地,使塔里木盆地总体表现为裂谷—拗拉槽—大陆边缘斜坡发展期。寒武纪古塔里木板块位于赤道附近的东冈瓦纳超大陆西北缘,处于拉张裂解环境^[20-22],南

天山—中天山为其被动陆缘,中天山与伊犁地体之间存在帖尔斯克依古洋,南部与西昆仑地体间存在西昆仑洋^[23]。塔里木古克拉通东部库满拗拉槽发育了稳定的以深水—陆棚相泥岩、碳酸盐岩为主要沉积物的塔东盆地,向西发育了以台地相碳酸盐岩、膏盐岩为主要沉积物的塔西台地。

寒武纪早期,塔西台地为一近椭圆形的孤立台

地,塔中隆起已见雏形,而巴楚隆起尚未形成,海侵水体覆盖了台地大部;塔西南发育一水上古陆,地震剖面上可见明显的地层上超尖灭^[15]。早寒武世晚期与中寒武世晚期为两个膏盐岩发育阶段,指示海水循环明显变弱,与台地边缘礁滩建隆快速生长对海水的阻隔作用有关。台地中西部发育的沙依里克组泥晶灰岩至塔中隆起东部相变为白云岩,指示该区为古地貌高地,海侵水体深度相对较浅。

4 层序地层格架建立

对层序格架的建立遵循以下四个原则:

(1)氧化色的泥晶白云岩相是识别层序界面的较可靠证据,灰质岩相往往代表水体较深时期的沉积;

(2)通过反映深水环境的岩相与浅水或暴露岩相的垂向叠置样式来确定退积、进积、加积的地层叠置样式;

(3)中、下寒武统发育的一套萨布哈环境蒸发—局限台地膏盐岩相沉积,其体系域的归属需根据岩石颜色与上下岩相组合来确定;

(4)以岩心为基础,综合测井、录井、地震资料,实现井下层序格架划分。

4.1 露头层序格架建立

在肖尔布拉克剖面,寒武系出露完整,且与上覆奥陶系和下伏震旦系均呈平行不整合接触。剖面测量成果^①将寒武系由下至上划分为228个小层(图2)。本次研究在野外观察的基础上,依据该小层划分方案共识别出8个Ⅲ级层序(SQ₁—SQ₈)和18个Ⅳ级层序。

层序1(SQ₁) 为玉尔吐斯组。与下伏震旦系齐格布拉克组平行不整合接触,齐格布拉克组顶部发育一套岩溶角砾岩,反映了海退暴露产生的岩溶作用。该层序下部1—3小层见到潮间带—潮下带上部常见的波状及透镜状层理、平行层理、板状交错层理,从下至上表现为潮间带向潮下带的演变。第4小层发育灰黑色含磷页岩夹薄层状白云岩,为水体最深时的沉积。向上深水岩相逐渐减少,白云岩相沉积增加,并发育波状层理。第11小层下部泥晶白云岩中见溶洞顺层分布,上部则发育潮坪环境下的微生物白云岩相沉积。1—4小层为海侵体系域(TST)沉积,5—11小层为高位体系域(HST)沉积。

层序2(SQ₂) 包括了肖尔布拉克组的中下部。

露头剖面上显示出与下部玉尔吐斯组明显不同的抗风化特征,层序界面清晰,易于识别。该层序下部主要发育结晶白云岩相(细—中晶),水平纹层、波状纹层发育,可见溶洞顺层面发育。向上结晶白云岩相存在不同程度的硅化现象,至16小层泥晶白云岩相厚度达到最大,反映此时沉积水体深度达到最大。层序中上部主要发育结晶白云岩相,硅质含量逐渐降低,岩石颜色由深灰色过渡为浅灰色,至第29小层发育浅灰色粉晶白云岩相,上部鸟眼构造十分发育。17—29小层的岩相特征表现为水体不断变浅的旋回。12—16小层为TST沉积,17—29小层为HST沉积,由2个高频层序(HFS)组成。

层序3(SQ₃) 包括了肖尔布拉克组的上部。层序下部主要沉积了微生物白云岩相、结晶白云岩相,藻纹层十分发育,见水平纹层及鸟眼构造,至37小层见薄层状泥晶白云岩相,纹层显示为页片状。总体表现为由潮间—潮下高能带向潮下低能带的演变。层序上部主要发育砂屑白云岩相夹泥晶白云岩相,见水平及波状纹层,反映了水动力变化频繁的潮间带环境。至第52小层发育杂色泥晶白云岩相,陆源泥质含量明显增加,表明地层遭受了暴露侵蚀为层序界面顶部。30—37小层为TST沉积,38—52小层为HST沉积,由2个HFS组成。

层序4(SQ₄) 包括了吾松格组。层序的下部主要为结晶白云岩相沉积,含泥质,水平及波状纹理发育。向上发育具丘状层理、弱变形层理的砂屑白云岩相白云岩,推测为潮下风暴带沉积。至第61小层发育叶片状泥晶白云岩夹粉晶白云岩相沉积,为水体最深时的沉积。层序上部发育砂屑白云岩相,向上砂屑含量降低,过渡为泥晶白云岩夹陆源碎屑富集的泥质条带,岩石新鲜面为氧化色,为典型的潮间—潮上带沉积,至第66层泥质含量达到最大。53—61小层为TST沉积,62—66小层为HST沉积,由2个HFS组成。

层序5(SQ₅) 为沙依里克组。其底部为粉晶白云岩相沉积,水平纹层、楔状纹层、波状纹层发育,与层序4存在明显的岩相突变。向上至第78小层则主要沉积了灰质岩相,纹层发育,代表了水体最深时的沉积。一般认为塔里木盆地寒武系石灰岩的出现表明沉积水体深度达到最大^[24],沙依里克组的该套灰质岩在台地中西部厚度分布稳定,横向连续性较强,向塔中隆起区则相变为白云岩相。第79小层则发育

砂屑灰岩相,含少量藻屑,顶部白云石化强烈,表明水体明显变浅,同时与上覆页片状粉晶白云岩、纹层状粉晶含灰质白云岩存在较明显的相变,为层序上界面。67—78小层为TST沉积,79小层为HST沉积,由2个HFS组成。

层序6(SQ₆)包括了阿瓦塔格组。层序下部主要发育白云岩相,夹暴露泥岩相,见水平层理、波状层理。向上至第91小层见薄层泥晶灰质岩相,夹薄层结晶白云岩相,构成韵律层理,波状平行层理发育,为该层序内最为稳定的一套灰质岩沉积。向上至第130小层主要发育白云岩相,顶部见砂屑白云岩相,反映水深明显变浅。80—91小层为TST沉积,92—130小层为HST沉积,由4个HFS组成。

层序7(SQ₇)包括了丘里塔格组的中下部。层序下部发育一大套结晶白云岩相,见平行层理、藻纹层构造、生物扰动构造,局部含燧石团块,属于典型的局限台地潮间带—潮下带上部沉积。至第179小层发育灰色纹层状泥晶白云岩相,指示此时沉积水体深度达到最大。向上发育结晶白云岩相及微生物白云岩相,向上晶型逐渐变粗,结晶白云岩含量增加,至第213小层可见沿层理分布厚度不均的脊和槽,沟槽可能为泥晶含量较多的区域,由水流冲刷形成,属典型的侵蚀暴露面,故以此为层序的上界面。131—179小层为TST沉积,180—213小层为HST沉积,由3个HFS组成。

层序8(SQ₈)包括了丘里塔格组的上部。层序下部主要为细晶白云岩相沉积,见平行层理,反映出潮下高能环境。向上至第220小层见灰色中层状粉晶白云岩相,属整个层序内晶型最细的层段,为一套潮下低能环境下的产物,指示海侵达到最大。该层向上可见细晶白云岩相、砂屑白云岩相、微生物白云岩相沉积,颜色逐渐变浅,纹层逐渐减少,反映了从潮下低能环境向潮下高能—潮间带的演化,至寒武系顶界(中晶白云岩相)为层序的顶界面。214—220小层为TST沉积,221—228小层为HST沉积,由2个HFS组成。

4.2 井下层序格架建立

寒武系钻井取心的长度(单井的取心长度普遍小于30m)相对于超过1000m厚的寒武纪地层而言微乎其微,仅能识别有限的层序界面。录井岩性剖面虽提供了全井段的岩性资料,但其精度远不及岩心,

难以完成层序的划分。本次研究通过基于Fisher判别的岩性识别和自然伽马(GR)测井曲线的最大熵谱分析(MESA),搭建起岩心资料与测井资料之间的桥梁;利用部分井段的岩屑资料对岩性识别的效果加以检验和修正;利用过井的地震资料对可识别的沉积间断面进行识别;综合多种资料实现了岩性剖面的细化,刻画了沉积旋回的发育样式,完成了井下高频层序的划分(图4)。

(1)Fisher判别分析的基本原理是寻找最合适的投影轴和维数,使得组间差异最大,组内差异最小^[25]。在取心段通过岩心观察识别出k种岩石类型,以岩相为类别标签 $l_i (i=1, 2, \dots, k)$,以其对应的m条测井响应作为识别参数(X_1, X_2, \dots, X_m)建立训练样本($l_i, X_1, X_2, \dots, X_m$),通过Fisher判别分析实现维数约减,得到n($n < m$)个典型判别函数,使其既保留了原始m个参数的信息,又能实现样本的有效识别。该方法综合应用的信息量大,判别准确度高^[26-28]。

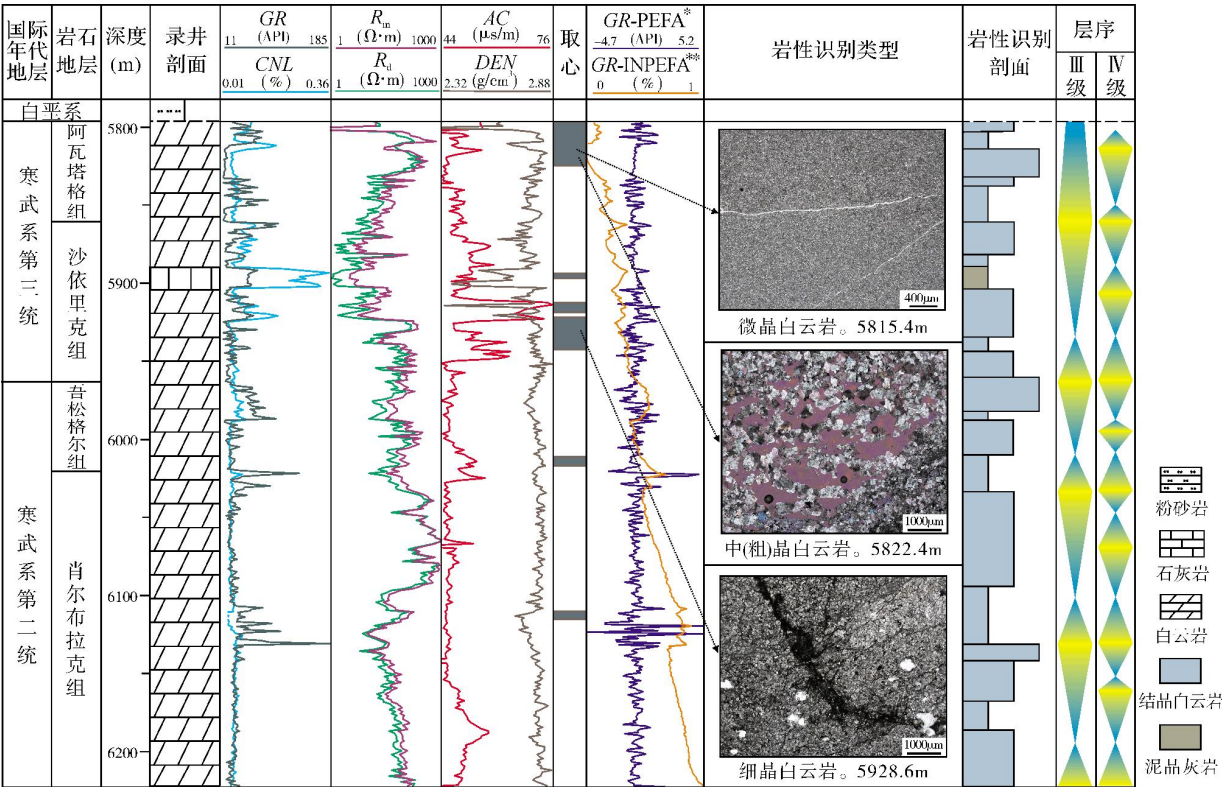
塔里木盆地钻井所遇寒武系的时间跨度长,空间距离远,不合适建立全区的训练样本集。本文对取心相对较多、岩性类别丰富的同1井、方1井、和4井、中深1井、巴探5井、牙哈5井分别建立训练样本并进行了岩性识别。利用GR、AC、DEN、CNL、R_d、R_m等6条曲线,通过Fisher判别分析构建判别函数,实现对不同岩性的区分。利用该方法可以用测井解释软件进行岩性的自动解释,最大限度地消除人为因素的影响^[28]。由于测井曲线值受井眼质量的影响很大^[29],故对于强烈扩径段进行岩性识别前应进行曲线校正。

(2)在最大熵谱分析中,一个不确定的随机过程,其最大熵谱值P(f)为:

$$P(f) = \frac{\Delta t \cdot P_m}{\left| 1 + \sum_{k=1}^m r_k \cdot e^{i2\pi f k \Delta t} \right|^2} \quad (1)$$

式中: Δt 为采样间隔, m ; P_m 为预测误差的方差; r_k 为预测误差滤波系数; m 是预测误差滤波器的滤波窗口。在具体分析中, m 的选择过小会导致重要的谱峰分辨不出,过大则会引起谱峰的分裂^[30-31]。

GR曲线对岩相和沉积环境有较好的响应并具有确定的物理意义,将其作为离散随机信号,利用公式(1)进行最大熵谱分析,通过Burg算法可以迭代出 r_k 。利用下述的自相关函数模型:



*GR-PEFA: 由GR曲线计算得到的预测误差曲线; **GR-INPEFA: 由GR曲线计算得到的预测误差趋势曲线

图4 基于岩性识别、GR 曲线最大熵谱分析的塔里木盆地寒武系钻井层序划分方案(以牙哈5井为例)
通过岩心观察,识别出3种岩相类型。利用GR等6条曲线进行了Fisher判别分析,对录井剖面进行了矫正,
其中石灰岩段录井识别准确,未参与计算

$$X_n = - \sum_{k=1}^m r_k \cdot X_{n-k} + \varepsilon_n \quad (2)$$

可以计算出测井曲线真实值与预测值的差别 ε_n , 利用测井曲线每一深度点的 ε_n 可以得到预测误差曲线(PEFA)。对 PEFA 曲线积分并标准化后便得预测误差趋势曲线(INPEFA)。

具体运用到碳酸盐岩地层中, 由 GR 曲线得到的 GR-INPEFA 曲线的正、负趋势、极值点和拐点, 正趋势代表了泥质含量的增加, 负趋势代表了泥质含量的减少, 极值点与拐点代表了可能的沉积间断。利用测井解释软件可以实现全井段的 GR-INPEFA 分析。

有学者认为, 对于经历多期成岩改造作用的古老碳酸盐岩而言, 自然伽马曲线或已受成岩流体所影响, 会造成不平衡的曲线响应^[32-33]。本研究通过实际的层序对比认为, 本区伽马曲线仍能良好地反映沉积环境, 依据包括两方面:

(1)岩相叠置模式与伽马曲线呈现良好的一致性, 如寒武系吾松格尔组和阿瓦塔格组广泛发育的潮下低能泥晶白云岩和潮上褐色泥质白云岩整体上表现为高伽马特征, 丘里塔格组质纯的细晶—中晶白云岩整体具有低伽马特征(图5a和5b);

(2)成岩作用如白云石化作用、溶蚀作用、胶结作用等会对沉积环境的识别产生影响, 但这些影响十分有限^[16]。

5 层序地层对比

盆地尺度的层序地层对比, 对于了解区域性地层、储层的配置有重要的促进作用。目前, 对寒武纪盆地尺度的层序对比, 前人只做过尝试性的工作^[4-9], 而对IV级层序的对比研究也仅仅限于露头或小区。本次研究基于露头和井下层序格架的建立, 完成了东西向和近南北向两条层序对比剖面(图1, 图5a和5b)。井下的寒武系顶面、底面, 主要

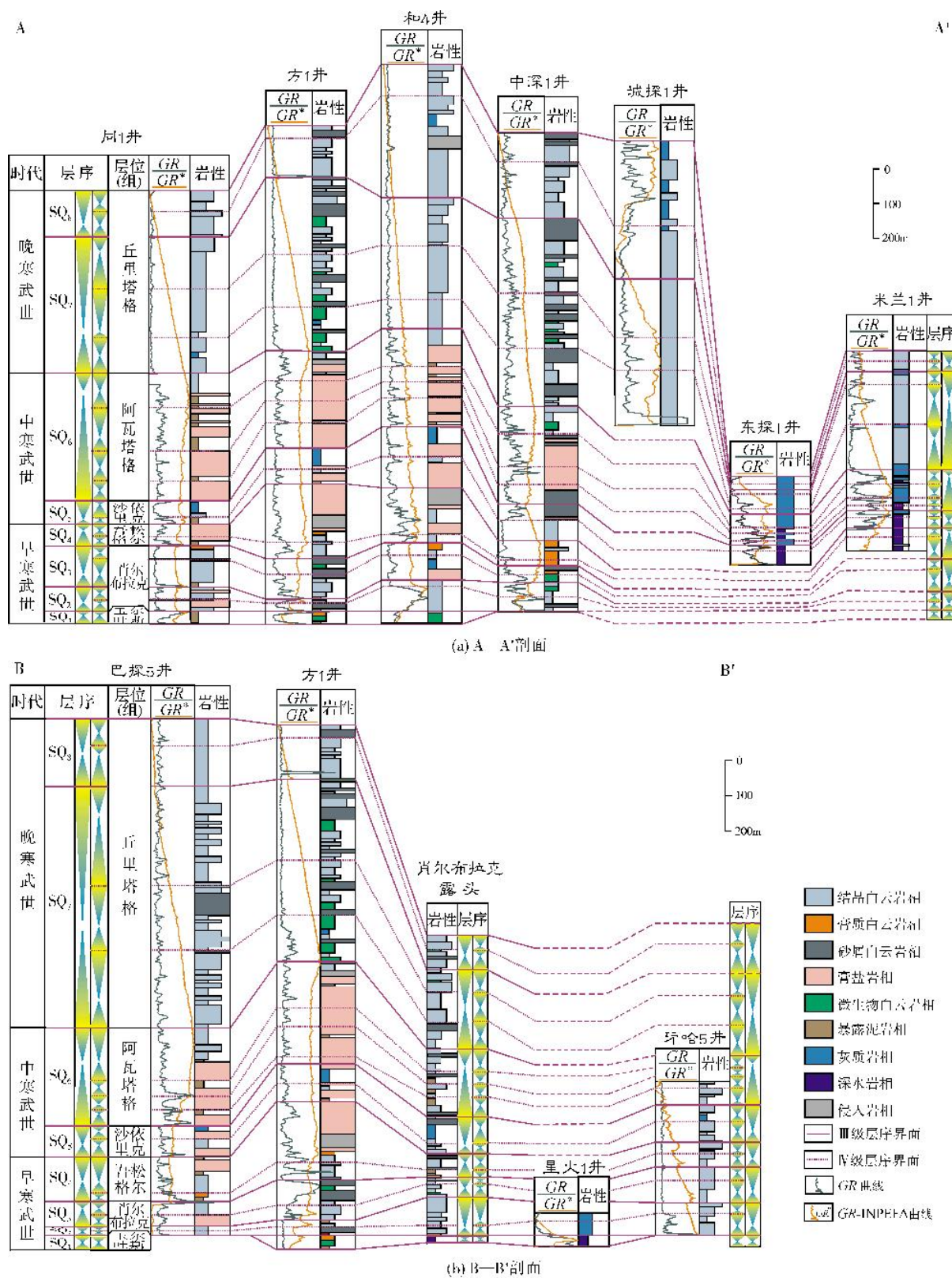


图5 塔里木盆地寒武系东西向和近南北向层序地层对比剖面
A—A'和B—B'剖面位置见图1

依据塔里木油田的地层划分方案^[20],它是目前能够得到的最为系统和可靠的等时界面。

5.1 东西向层序地层对比

图5a(A—A'剖面)为一条东西向的、长1 022 km的层序对比剖面,从塔西台地同1井向东延伸至罗西台地米兰1井。由于部分钻井未完全钻穿寒武系,故图中对这些层序的发育进行了预测。

早寒武世共发育4个Ⅲ级层序、7个Ⅳ级层序。沉积速率以方1井最大(减去侵入岩的厚度)(图6a),向两侧下寒武统厚度减薄。中深1井则缺失层序1,反映该地区为局部的正地貌。位于塔东盆地的东探1井虽未钻揭下寒武统,但预测此处应发育玉尔吐斯组。层序2—层序4中不同程度地发育膏盐岩,其中,层序2和层序3的膏盐岩具有局限性,推测此时可能为局部性的台内洼地环境。层序4的膏盐岩沉积,在整个台地范围内均有发育,其原因在于开阔台地与局限台地之间的碳酸盐沉积速率存在差异^[34-36],造成塔西台地东部的沉积厚度要大于中西部,在台内地区形成周缘高、中间低的地貌结构,为大面积分布的膏盐岩沉积提供了条件。

中寒武世共发育2个Ⅲ级层序、6个Ⅳ级层序。地层沉积速率以和4井为最大(图6a)。沙依里克沉积期塔里木盆地经历了一次最大范围的海侵过程,由此在层序5的中上部发育了一套可区域性对比的暗色灰质岩相。该套灰质岩相至中深1井相变为砂屑白云岩相,表明受塔中隆起的控制,水体变浅,能量增强;到盆地区东探1井则相变为深水岩相。从层序6沉积开始,塔西台地再次进入膏盐岩沉积期,广泛发育膏盐岩相与暴露泥岩相,持续时间约6 Ma。层序6可进一步划分出4个Ⅳ级层序,沉积环境与层序4类似。

晚寒武世共发育2个Ⅲ级层序、5个Ⅳ级层序。层序7和层序8在台地内部主要以结晶白云岩相和砂屑白云岩相为主,并向塔东盆地方向过渡为灰质岩相。沉积速率在和4井和中深1井均较大,城探1井可能更大(图6a),盆地相及斜坡相的东探1井、米兰1井则显示出很低的沉积速率,其原因是水体深度增加导致的碳酸盐岩产率的降低;GR值低且稳定(图5a),表明水体环境稳定,可容纳空间变化不大。

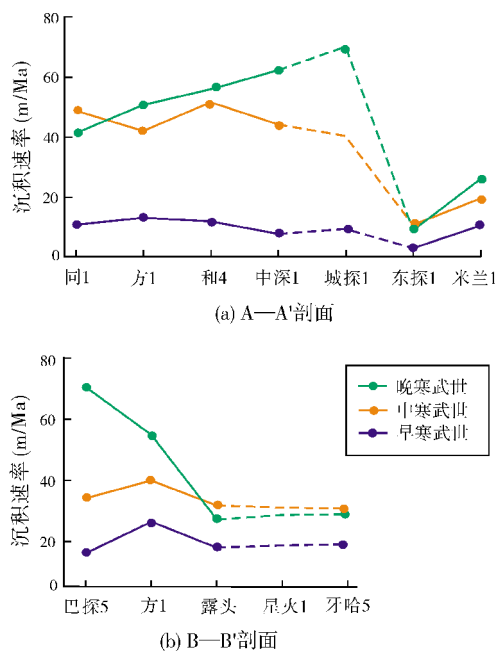


图6 塔里木盆地寒武系层序地层对比剖面中各井沉积速率图
层序地层剖面见图5

5.2 南北向层序地层对比

图5b(B—B'剖面)为一条近南北向的、长为505 km的层序对比剖面,它从巴楚隆起延伸至塔北潜山区。图中对塔北剥蚀区的层序发育情况做了预测。

层序1仅在方1井至星火1井之间发育,而巴探5井和牙哈5井均以肖尔布拉克组与下伏震旦系齐格布拉克组不整合接触。层序1的岩相,自方1井的结晶白云岩相和微生物白云岩相过渡到露头区和星火1井的深水岩相,反映了从碳酸盐岩内缓坡到外缓坡等时沉积的岩相过渡。层序2在露头区沉积厚度最大,从巴探5井的泥晶白云岩相过渡到星火1井的灰质岩相,此时沉积环境开始由碳酸盐岩缓坡向碳酸盐岩台地转变。层序3继承了层序2的沉积地形,层序下部从露头的结晶白云岩相过渡到巴探5井的膏盐岩相。层序4—层序6在巴楚地区以膏盐岩相为主,向北至牙哈5井则以结晶白云岩为主体岩相,其中层序5膏盐岩中夹一套厚度稳定的灰质岩相,为海侵最大时的沉积。总体上,早—中寒武世的沉积速率以方1井最大(图6b),至晚寒武世,沉积中心迁移至巴探5井(图6b),岩相以结晶

白云岩相、砂屑白云岩相沉积为主,向北沉积厚度渐次减薄,表明随着海侵范围的进一步增大,台内环境更适合碳酸盐岩产率的提高。

露头区寒武系不发育膏盐岩,使得井下膏盐岩段层序(特别是高频层序)的划分缺乏直接的岩石学依据。前人研究认为,灰色或灰白色膏盐岩为水下成因,属层序晚期的沉积,此时仍具有一定的可容纳空间,可形成一定厚度的水下沉积,而红褐色膏盐岩为水上成因,属海侵初期的产物^[37],随着水体深度的增加逐渐变为碳酸盐岩沉积。

5.3 东西向与南北向层序地层对比

从以上的东西向和南北向两条剖面(图5a与图5b)的对比来看,通过基于GR测井曲线的岩性识别和频谱变化属性分析,可以寻找到较为可靠的层序界面,实现盆地尺度的层序划分对比。

早寒武世主要为碳酸盐岩缓坡背景下的沉积;中一晚寒武世广泛发育的膏盐岩反映了持续性的蒸发—局限台地环境;晚寒武世则发育一套稳定的低GR特征的白云岩相沉积。岩相的叠置样式与相序的变化,显示出从碳酸盐岩缓坡向镶边台地的沉积环境演化。

从早寒武世到晚寒武世,地层沉积速率逐渐增大,沉积中心从巴楚地区的方1井向南东方向迁移,向盆地方向进积。早寒武世受控于缓坡地貌和小规模海侵,地层的沉积厚度及侧向变化较小;晚期由于膏盐岩具有高沉积速率,导致了地形的填平补齐。中寒武世晚期的膏盐岩沉积再次形成了沉积速率的较大差异,碳酸盐岩仅在台地边缘及斜坡地带发育。晚寒武世塔里木盆地海侵规模变大并保持了一个相对稳定的可容纳空间,全区岩性变化不大,受控于地貌和气候的碳酸盐岩产率在巴探5井和中深1井达到最大。

6 层序对储层的控制作用

在碳酸盐岩中,层序的发育主要受海平面变化、构造沉降、沉积物供给和气候等四个因素的控制^[38-40]。碳酸盐岩的沉积速率主要受控于光照和水深,0~20m的水深最有利于碳酸盐岩的沉积;随着地球纬度的增加,特别是30°以上的高纬度区,碳酸盐岩的产率会明显降低。一般地,在Ⅲ级层序的时间间隔内,板块的漂移很难导致大的气候变化,相同的水深,其沉积物的

供给速率也基本保持一致^[41],因此影响岩相变化及沉积层序的主要是海平面变化和构造沉降。

赵宗举等^[5]将寒武系层序类型分为构造型层序和海平面变化型层序。结合大地构造背景,本文认为层序1和层序5属于拉张裂解背景下的构造型层序。这类层序往往伴随着快速的基底沉降,水体快速加深,随后发生沉积物的填平补齐,可容纳空间变化速率较快。微生物格架白云岩和白云质灰岩是这类层序中最主要的储层。在沉积水体较浅的地带,微生物格架白云岩为层序1主要的储层,以藻格架孔为主要的孔隙类型,但膏质充填和硅化作用会对储层造成破坏;水体深度较大时,白云质灰岩成为层序3主要的储集层。不均一的白云石化作用形成了大量的晶间孔、晶间溶孔,在康2井、和4井的岩心上均见到了该类储层。其余层序均为海平面变化型层序,全球海平面的变化控制了层序的发育。浅水高能环境下的砂屑白云岩及细中晶白云岩沉积是相对较好的储层段,储集空间包括残余颗粒间孔、晶间孔等,如方1井丘里塔格组和牙哈5井阿瓦塔格组均发育此类储层,但因过度白云石化导致的胶结作用却会造成储集性能变差。

层序界面代表了沉积作用的暂时停止,并伴有强度不同的风化剥蚀,易发育层间岩溶作用及白云石化作用^[42-43],从而形成储层。通过对比层序和储层的发育关系,本文认为寒武系Ⅲ级、Ⅳ级层序界面对储层的发育具有控制作用。以城探1井为例(见图7),寒武系顶面以下发育了两段有效储层(6 814.0~6 817.2m和6 922.0~6 939.2m,黄色层段处)。井深6 800m处地震剖面表现为连续强反射特征(蓝色箭头),图5a中该井GR-INPEFA曲线表现出明显的趋势变化,将其识别为Ⅳ级层序界面,该界面之下14m测井解释有效储层3.2m,平均孔隙度3.3%。该井钻遇的礁滩体顶面在地震剖面上可见明显的地层削截(黑色箭头),根据井震标定可确定为Ⅳ级层序界面(6 920m);其下2m,测井解释有效储层为17.2m,测井解释平均孔隙度为3.6%。该段储层岩心可见针状溶孔顺层发育,角砾化特征明显,溶洞发育,见沥青充填。有效储层的纵向分布与层序界面良好的一致性,表明层序界面对储层有明显的控制作用,层序界面附近储层明显发育。

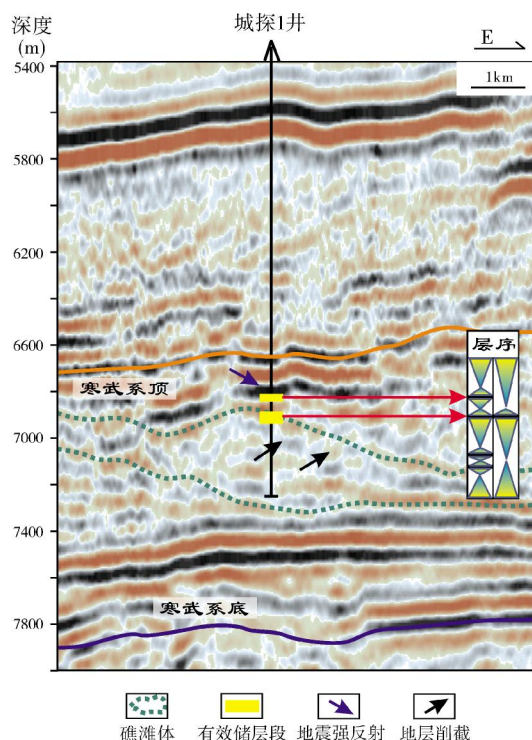


图7 塔里木盆地过城探1井的地震反射剖面
与储层发育特征
岩性剖面见图5a

7 结论

塔里木盆地寒武系共发育8类对沉积环境有指示意义的岩相,分别为深水岩相、结晶白云岩相、含膏白云岩相、膏盐岩相、暴露泥岩相、砂屑白云岩相、灰质岩相和微生物白云岩相。利用岩相发育特征及叠置样式对肖尔布拉克露头进行层序划分。露头区寒武系共发育8个Ⅲ级层序,18个Ⅳ级层序。

寒武系钻井的录井岩性剖面精度难以达到层序划分的要求。通过Fisher判别方法,利用岩心和测井资料完成了对录井剖面的细化,利用岩屑资料对岩性识别的效果加以了检验和修正识别,利用GR曲线的最大熵谱分析(MESA)和过井地震剖面对可能的层序界面进行了识别,综合以上多种资料完成了井下高频层序的划分。

利用10口钻井及露头完成了东西向和近南北向两条盆地尺度的层序地层剖面对比,从早寒武世到晚寒武世,地层沉积速率逐渐增大,沉积中心从巴楚地区的方1井向南东东方向迁移,向盆地方向进积。层序类型不同,储层发育特征亦不同,构造型层

序中以微生物格架白云岩相和灰质岩相为主要的储集岩相,海平面变化型层序中以砂屑白云岩相和细中晶白云岩相为主要的储集岩相。层序界面处存在短暂的地层暴露,利于优质储层的发育。

参考文献

- [1] 陈国俊,史基安,薛莲花,等.塔里木西部古生代层序地层特征[J].沉积学报,1999,17(4): 560-565.
- [2] 贾承造,刘德来,赵文智,等.层序地层学研究新进展[J].石油勘探与开发,2002,29(5): 1-4.
- [3] Vilas L, Martín-Chivelet J, Arias C. Integration of subsidence and sequence stratigraphic analyses in the Cretaceous carbonate platforms of the Prebetic(Jumilla-Yecla Region), Spain[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2003, 200 (1/4): 107-129.
- [4] 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.
- [5] 赵宗举,张运波,潘懋,等.塔里木盆地寒武系层序地层格架[J].地质论评,2010,56(5): 609-620.
- [6] 于炳松,陈建强,林畅松.塔里木地台北部寒武纪—奥陶纪层序地层及其与扬子地台和华北地台的对比[J].中国科学: D辑 地球科学,2001,31(1): 17-26.
- [7] 杨永剑,刘家铎,田景春,等.塔里木盆地寒武纪层序岩相古地理特征[J].天然气地球科学,2011,22(3): 450-459.
- [8] 肖朝晖,王招明,姜仁旗,等.塔里木盆地寒武系碳酸盐岩层序地层特征[J].石油与天然气地质,2011,32(1): 1-10.
- [9] 刘忠宝,杨圣彬,焦存礼,等.塔里木盆地巴楚隆起中、下寒武统高精度层序地层与沉积特征[J].石油与天然气地质,2012,33(1): 70-76.
- [10] 翟光明,何文渊.塔里木盆地石油勘探实现突破的重要方向[J].石油学报,2004,25(1): 1-7.
- [11] 庞雄奇,周新源,鄢盛华,等.中国叠合盆地油气成藏研究进展与发展方向——以塔里木盆地为例[J].石油勘探与开发,2012,39(6): 649-656.
- [12] 朱光有,杨海军,苏劲,等.塔里木盆地海相石油的真实勘探潜力[J].岩石学报,2012,28(4): 1333-1347.
- [13] 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.
- [14] 冯增昭,鲍志东,吴茂炳,等.塔里木地区寒武纪岩相古地理[J].古地理学报,2006,8(4): 427-439.
- [15] 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.
- [16] Al-Awwad S, Collins L B. Carbonate-platform scale correlation of stacked high-frequency sequences in the Arab-D reservoir, Saudi Arabia[J]. Sedimentary Geology, 2013, 294(3): 205-218.
- [17] Kietzmann D A, Balma R M, Riccardi A C, et al. Sedimentology and sequence stratigraphy of a Tithonian-Valanginian carbonate ramp (Vaca Muerta Formation): A misunderstood exceptional source rock in the Southern Mendoza area of the Neuquén Basin, Argentina[J]. Sedimentary Geology, 2014, 302: 64-86.
- [18] Tucker M E, Wright V P, Dickson J A D. Carbonate sedimentology[M]. Oxford: Wiley-Blackwell, 1990: 34-37.

- [19] Flügel E. Microfacies of carbonate rocks analysis, interpretation and application[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 684-685.
- [20] 张光亚, 刘伟, 张磊, 等. 塔里木克拉通寒武纪—奥陶纪原型盆地、岩相古地理与油气[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 269-276.
- [21] 贾承造, 魏国齐, 姚惠君, 等. 塔里木盆地构造演化与区域构造地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [22] 张光亚, 刘伟, 杨海军, 等. 塔里木克拉通寒武纪—奥陶纪原型盆地与岩相古地理[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 41-80.
- [23] 杨永剑. 塔里木盆地寒武系层序岩相古地理及生储盖特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011: 15-22.
- [24] 冯增昭, 鲍志东, 吴炳茂, 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.
- [25] 赵永军, 李汉林. 石油数学地质[M]. 北京: 石油大学出版社, 1998.
- [26] 王郑库, 欧成华, 李凤霞. 火山岩储层岩性识别研究[J]. 国外测井技术, 2007, 22(1): 8-11.
- [27] 张莹, 潘保芝. 松辽盆地火山岩岩性识别中测井数据的选择及判别方法[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 831-834.
- [28] 王坤, 张奉, 张翊, 等. 准西车排子凸起石炭系岩性识别与储层特征[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2014, 36(4): 21-28.
- [29] 丁次乾. 矿场地球物理[M]. 东营: 石油大学出版社, 1992: 87-91.
- [30] 马海珍, 茅金根, 王丛彬, 等. 利用最大熵伯格预测和时频分析法提高地震资料分辨率[J]. 石油物探, 2002, 41(1): 80-83.
- [31] 高晓峰, 徐之海. 线型优化最大熵光谱估计方法中自回归模型两种求解方法的比较[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(11): 2717-2720.
- [32] Ivanovich M, Harmon R S. Uranium-series disequilibrium: Applications to earth, marine, and environmental sciences [M]. Oxford: Clarendon Press, 1992.
- [33] Mey J L. The Uranium series diagenesis and the morphology of drowned barbadian paleo-reefs[D]. New York: City University of New York, 2008: 15-31.
- [34] Wilson J L. Carbonate facies in geologic history[M]. New York: Springer-Verlag, 1975.
- [35] Schlager W. Accommodation and supply—A dual control on stratigraphic sequences[J]. Sedimentary Geology, 1993, 86(1/2): 111-136.
- [36] Madden R H C, Wilson M E J. Diagenesis of a SE Asian Cenozoic carbonate platform margin and its adjacent basinal deposits[J]. Sedimentary Geology, 2013, 286(3): 20-38.
- [37] Sarg J F. Carbonate sequence stratigraphy [C]//Posementier H, Wilgus C K, Hastings B S, et al. Sea level changes: An integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 1988, 42: 155-181.
- [38] 刘家铎, 田景春, 张翔, 等. 塔里木盆地寒武系层序界面特征及其油气地质意义[J]. 矿物岩石, 2009, 29(4): 1-6.
- [39] Liang T, Jones B. Deciphering the impact of sea-level changes and tectonic movement on erosional sequence boundaries in carbonate successions: A case study from Tertiary strata on Grand Cayman and Cayman Brac, British West Indies [J]. Sedimentary Geology, 2014, 305: 17-34.
- [40] Puga-Bernabéu Á, Martín J M, Braga J C, et al. Offshore remobilization processes and deposits in low-energy temperate-water carbonate-ramp systems: Examples from the Neogene basins of the Betic Cordillera (SE Spain)[J]. Sedimentary Geology, 2014, 304: 11-27.
- [41] Williams H D, Burgess P M, Wright V P, et al. Investigating carbonate platform types: Multiple controls and a continuum geometries[J]. Journal of Sedimentary Research, 2011, 81(1): 18-37.
- [42] 张宝民, 刘静江. 中国岩溶储集层分类与特征及相关的理论问题[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 12-29.
- [43] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 1-12.

编辑: 赵国宪

Division and Correlation of Cambrian Stratigraphic Sequences under Multiple Data Constraint, Tarim Basin

Wang Kun, Liu Wei, Huang Qingyu, Shi Shuyuan, Wang Ping, Zhang Yanqiu

Abstract: Cambrian outcrops are rare in distribution in Tarim Basin and only a few drilled wells penetrated through the whole Cambrian strata. These facts make difficulty for geologists to carry out the study of basin-scaled stratigraphic sequence. On the base of the data from outcrops at Xiaerbulake, a detailed analysis of stratigraphic sequence framework was conducted according to the lithofacies characteristics and their stacking patterns. The Cambrian strata consists of 8 III-order sequences and 18 IV-order sequences. The lithologic sections of wells obtained by geological logging are low in accuracy, which can't meet the requirement of sequence division. Based on the Fisher discriminant analysis, wells were conducted on the lithology identification with core data and well logging data. Depending on the Maximum Entropy Spectrum analysis of the GR curves, changing trends of the shale content in carbonate rocks within wells were analyzed. Seismic data were also used to identify the sequence boundary. The data from 10 wells and 1 outcrop that are representative to the W-E and N-S profiles across the basin were conducted on sequence division under constraint of multiple data. Combined with wells and outcrop division, 2 sections of high-frequency sequence were correlated. It is concluded that, the depositing rate generally increased during Cambrian period, and depocenter migrated toward Tadong region. Different types of reservoirs occur in different sequence types. Sequence boundaries are favourable for developing good reservoirs.

Key words: Cambrian; Sequence stratigraph; Sequence correlation; Lithofacies; Reservoir; Tarim Basin

Wang Kun; DSc. Add: PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Box 910, 20 Xueyuan Rd., Beijing, 100083, China