

塔里木盆地寒武系层序地层格架

赵宗举^{1,2)}, 张运波³⁾, 潘懋¹⁾, 吴兴宁⁴⁾, 潘文庆^{1,5)}

1) 北京大学地球与空间科学学院, 北京, 100871;

2) 提高石油采收率国家重点实验室(中国石油勘探开发研究院), 北京, 100083;

3) 中国地质大学(北京)能源学院, 北京, 100083;

4) 中国石油杭州地质研究院, 杭州, 310023; 5) 中国石油塔里木油田分公司, 新疆库尔勒, 841000

内容提要:通过露头、钻测井及地震层序地层特征综合分析,建立了塔里木盆地寒武系三级层序地层格架,将寒武系划分出6个可全盆地追踪与对比的三级层序。结合反映全球海平面相对变化的全岩碳同位素旋回与反映沉积古水深相对变化的沉积旋回的对比分析,可将塔里木盆地寒武系三级层序分为主要受全球海平面变化控制形成的全球海平面层序(层序CSQ2、CSQ4、CSQ5、CSQ6)及主要受地区性构造沉降作用控制形成的构造层序(层序CSQ1、CSQ3)2类。塔北轮南地区寒武系台地边缘总体呈现由早寒武世的缓坡向中一晚寒武世的镶边台地的演变以及由西向东的进积叠置型式,推测主要与寒武纪全球海平面总体微弱下降及塔里木盆地基底沉降速率总体稳定且较小有关。

关键词:三级层序;碳同位素;全球海平面层序;构造层序;碳酸盐岩;寒武纪;塔里木盆地

前人在塔里木盆地寒武系的层序划分及层序地层格架方面,做了一些工作,主要集中在塔北—柯坪地区,对其它地区的研究较少;所发表的论文主要涉及整个古生界的层序划分与宏观研究。由于不同学者所采用的层序级别划分标准及利用的主要资料(露头剖面、地震资料等)不同,造成三级层序划分数量存在很大差异。以露头资料为主将塔里木盆地北部寒武系划分出19~21个三级层序(于炳松等,1996,2001),而以地震资料为主则多划分出3~5个(陈国俊等,1999;王毅,1999;焦存礼等,2003)及11个三级层序(樊太亮等,1997)。本文从全盆地角度出发,在系统古生物地层学研究基础上(张师本等,1991;贾承造等,2004),通过露头、钻井及地震层序相结合的手段,对塔里木盆地寒武系进行了层序地层综合研究。

1 露头层序地层特征

通过实测塔里木盆地西缘阿克苏肖尔布拉克寒武系露头剖面(剖面起点为:N40°54'47.8",E79°50'42.5"),可以将寒武系划分出6个三级层序(图1),

各层序特征如下:

层序CSQ1相当于玉尔吐斯组,其下为上震旦统奇格布拉克组局限台地相白云岩,其间属于典型的暴露层序界面,界面之下为奇格布拉克组顶部的岩溶角砾岩,反映了层序界面暴露产生的强烈岩溶成因,从图2中还见到了凹凸不平的层序界面之上形成的填平补齐式潮间—潮上带沉积。下部海侵体系域厚约6m,主要由一套白云岩夹燧石组成,其间见到潮间带—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,推测原岩为砂屑灰岩,燧石条带中还发育藻纹层构造,反映其与潮坪环境藻类成因有关,总体表现为由下向上由潮间带向潮下带的演变,说明沉积水体逐渐加深,是海侵体系域的典型沉积响应。中部厚22m灰绿色页岩夹黑灰色薄板状磷矿、硅质岩,相当于凝缩段,磷矿代表沉积速率极其缓慢的静水沉积,大致相当于外缓坡下部环境。上部高位体系域厚约17m,由一套白云岩、灰绿色页岩夹少量磷矿条带、泥晶粉屑砂屑灰岩构成,其中见到多个透镜状风暴成因白云质砂屑、生屑灰岩,并发育波状层理,说明形成于风暴作用环境,

注:本文为国家科技重大专项课题(编号2008ZX05004-001)及中国石油天然气股份有限公司重大专项课题(编号2008E-0702)的成果。

收稿日期:2010-01-20;改回日期:2010-03-31;责任编辑:章雨旭。

作者简介:赵宗举,男,1967年生。博士后,教授级高级工程师。主要从事海相沉积储集层及油气地质综合研究。通讯地址:100083,北京市学院路20号910信箱石油地质实验研究中心;传真:010-83597480;Email:zhaozongju@petrochina.com.cn。

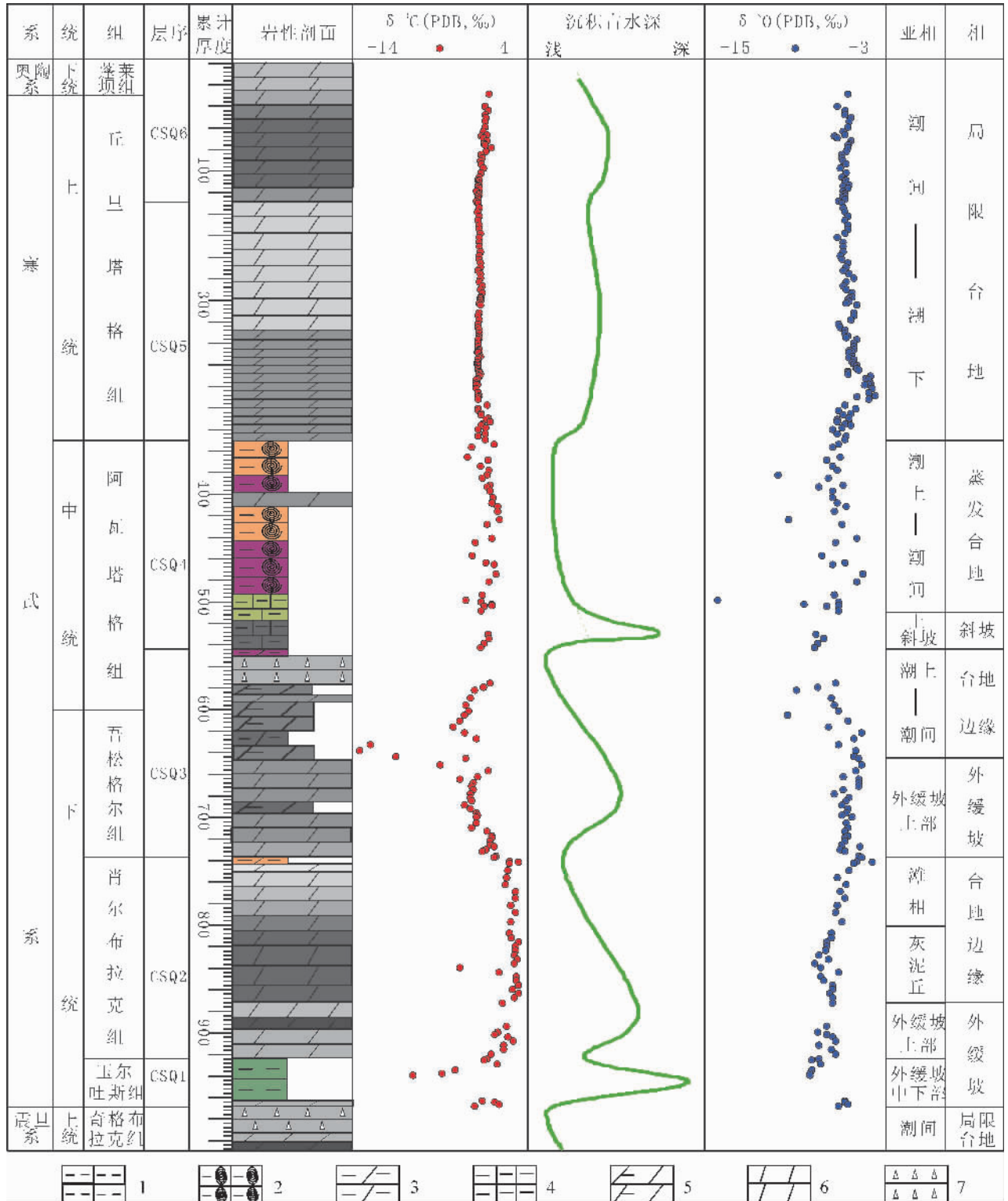


图1 塔里木盆地西缘阿克苏地区寒武系露头层序柱状图

Fig. 1 The outcrop sequences section of Cambrian in Aksu area, western margin of the Tarim basin

1—泥岩/页岩; 2—钙质泥岩; 3—白云质泥岩; 4—泥质灰岩; 5—泥质白云岩; 6—白云岩; 7—岩溶角砾岩

1—mudstone / shale; 2—calcareous mudstone; 3—dolomitized mudstone; 4—argillaceous limestone;

5—argillaceous dolostone; 6—dolostone; 7—karst breccia



图 2 下寒武统层序 CSQ1 底、顶部层序界面特征

Fig. 2 The bottom and top sequence boundary of sequence CSQ1 in Lower Cambrian

左:层序 CSQ1 底面为暴露面,其下为上震旦统奇格布拉克组顶部岩溶砾岩(白云岩),其上为下寒武统玉尔吐斯组底部泥质白云岩及白云岩夹褐铁矿条纹;右:层序 CSQ1(玉尔吐斯组)顶面(箭头所指)为岩相转换面,其上、下表现为明显不同抗风化特征。阿克苏肖尔布拉克剖面

Left: the bottom boundary of sequence CSQ1 was exposure surface, below which is karst breccia (dolostone) in top of the Qigebulake Fm. Ediacaran, and upon which is argillaceous dolostone and dolostone intercalated limonite striae in bottom of the Yuertusi Fm., Lower Cambrian. Right: the top surface (arrow) of sequence CSQ1 (the Yuertusi Fm.) is lithofacies conversion boundary, upon and below which manifested different weathering characters. Xiaerbulake section, Aksu, Xinjiang

相当于外缓坡中—上部。

层序 CSQ2 相当于肖尔布拉克组,下部海侵体系域厚约 29m,为一套深灰色白云岩,发育波状层理、弱变形层理、丘状交错层理,推测原岩为风暴成因泥晶粉屑砂屑灰岩,形成于外缓坡上部潮下风暴

作用带。其下即为层序界面,界面之下发育暗紫红色白云质泥岩,反映沉积水体变浅之后的氧化环境,该界面上、下的宏观岩性特征也截然不同(其下为外缓坡相泥岩及白云岩、其上为外缓坡相白云岩),属于岩相转换面(图 2)。中部厚 23m 深灰—黑灰色不

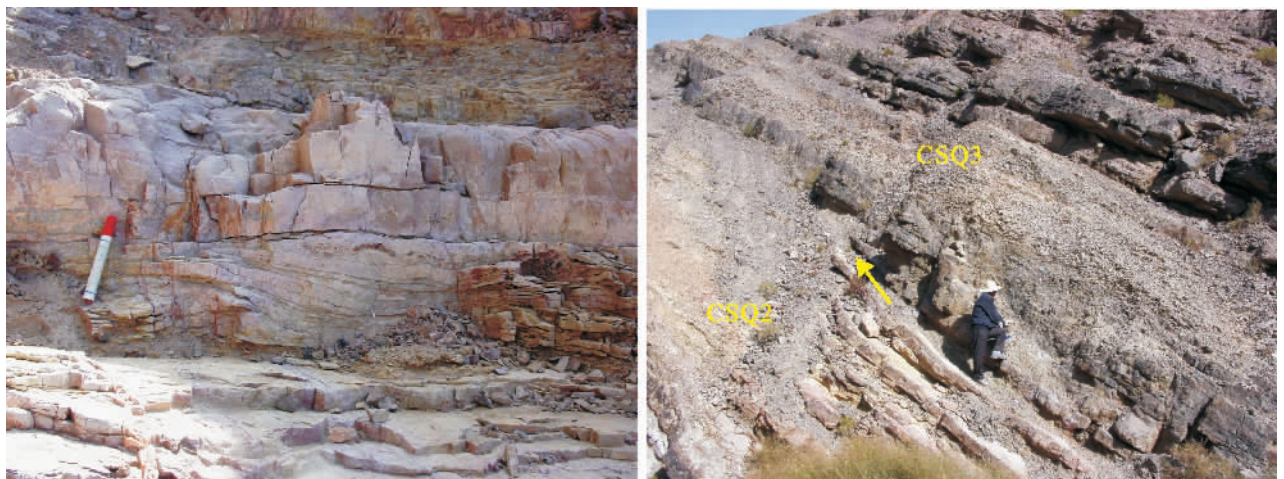


图 3 下寒武统层序 CSQ2 顶部层序界面特征

Fig. 3 The top sequence boundary of sequence CSQ2 in Lower Cambrian

左:潮上带帐篷构造白云质泥岩,肖尔布拉克组(层序 CSQ2)顶部;右:层序 CSQ2 顶面(箭头所指)为岩相突变面,其下为肖尔布拉克组局限台地相白云岩及泥质白云岩、其上为吾松格儿组外缓坡相泥质白云岩。阿克苏肖尔布拉克剖面

Left: supratidal teepee structure, dolomitized mudstone, the top of the Xiaerbulake Fm. (Sequence CSQ2); Right: the top surface (arrow) of sequence CSQ2 is lithofacies mutation boundary, below which is restricted platform dolostone and argillaceous dolostone in Xiaerbulake Fm., upon which is outer ramp argillaceous dolostone in Wusonggeer Fm. Xiaerbulake section, Aksu, Xinjiang

规则薄层状粉细晶白云岩,相当于凝缩段。中—上部高位体系域厚约 135m,由一大套白云岩构成,向上颜色变浅,原岩可能以亮晶砂屑灰岩为主,见藻纹层构造、平行层理,推测属于台地边缘灰泥丘(张宝民等,2004)一滩相沉积;顶部为黄灰色、局部暗紫红色白云质泥岩,并见帐篷构造,反映为顶部层序界面潮上带暴露成因(图 3)。

层序 CSQ3 相当于吾松格尔组及阿瓦塔格组下部,其底部层序界面上、下表现出明显不同的岩性及其宏观风化特征(其下为肖尔布拉克组局限台地相潮间—潮上带白云岩及泥质白云岩,其上为吾松格尔组外缓坡相泥质白云岩),属于岩相突变面(图 3)。吾松格尔组中—下部厚约 93m 相当于海侵体系域,主要由一套风暴成因具丘状层理、弱变形层理、竹叶状构造的白云岩(原岩可能为泥晶粉屑砂屑灰岩)夹纹层状构造白云岩(原岩可能为藻纹层灰岩)、泥质白云岩构成,形成于外缓坡上部潮下风暴带。吾松格尔组顶部 44.5m 及阿瓦塔格组底部 21.5m 为泥质白云岩(原岩为泥质灰岩)与白云质泥岩、白云岩(发育纹层状构造及波状构造,原岩可能为藻纹层灰岩)组成,属于局限台地边缘潮间—潮上带沉积,为高位体系域;而其上的阿瓦塔格组下部厚 32m 白云质岩溶角砾岩(角砾成份为粉细晶白云岩,原岩可能为泥晶粉屑砂屑灰岩,少数角砾可见纹层状构造,原岩可能为藻纹层灰岩)及厚 3m 黄灰—紫灰色风化壳白云质泥岩,均反映为受其顶部层序界面暴露氧化—风化改造特征(图 4)。

层序 CSQ4 相当于阿瓦塔格组中—上部,其海侵体系域下部发育厚约 34m 的斜坡相深灰色不规则薄板状泥晶灰岩夹钙质泥岩条带及崩塌角砾岩(图 4、图 5),角砾成份为亮晶砂屑灰岩,见平行层理、低角度交错层理(为异地再搬运沉积,来源于台地边缘浅滩相沉积),反映为层序界面暴露之后沉积水体突然加深所形成的海侵沉积。海侵体系域中—上部厚 19m,主要为一套潮间—潮上带泥质灰岩及钙质泥岩、泥质白云岩(发育纹层状构造,原岩可能为藻纹层灰岩)、白云岩(原岩可能为砂屑灰岩)夹斜坡相白云质角砾岩。高位体系域厚约 140m,为一大套蒸发台地潮间—潮上带褐黄色、紫红色钙质泥岩夹泥质灰岩、风暴成因丘状层理、弱变形层理白云岩(原岩为风暴成因泥晶生屑或砂屑灰岩)、藻纹层白云岩(原岩为藻纹层灰岩)、波状叠层石白云岩,见浪成波痕、脉状层理(图 6);顶部 16.6m 为 2 个典型的向上变浅准层序,每个准层序均分别由 4 个向上变

浅的潮间带白云岩—潮上带泥岩韵律层组成(图 7),是高位体系域的典型准层序叠置特征。

层序 CSQ5 相当于丘里塔格组下部,其底部为深灰色薄层状粉细晶白云岩,原岩为泥晶灰岩,代表了海侵体系域初期的潮下带静水沉积(图 7);其海侵体系域厚约 106m,主要为一套白云岩构成,发育平行层理(原岩可能为亮晶砂屑灰岩)、藻纹层构造(原岩为藻纹层灰岩)、生物扰动构造(原岩可能为藻粘结灰岩)、风暴成因弱变形层理及丘状层理(原岩可能为泥亮晶砂屑灰岩)、半球状、柱状叠层石构造(原岩为叠层石灰岩)、夹透镜状白云岩(原岩为水道充填亮晶砂屑灰岩),局部含燧石团块,属于典型局限台地潮间带—潮下带上部沉积。高位体系域厚约 115m,主要岩性为白云岩,发育生物扰动构造(原岩为藻粘结灰岩)、藻纹层构造(原岩为藻纹层灰岩)、平行层理(原岩为亮晶砂屑灰岩),也属于局限台地潮间带—潮下带上部沉积。层序 CSQ5 顶部为岩相转换面,该界面之下为浅灰色中厚—厚层状粉细晶白云岩,原岩为亮晶砂屑灰岩夹藻纹层灰岩,属潮间带—潮下带上部沉积;界面之上为深灰—黑灰色中厚层状粉细晶白云岩,见生物扰动,原岩为藻粘结灰岩,属潮下低能带藻席沉积,界面呈凹凸不平状(图 8)。

层序 CSQ6 相当于上寒武统丘里塔格组上部—下奥陶统蓬莱坝组下部,其底部为深灰—黑灰色白云岩,见生物扰动,原岩为藻粘结灰岩,与下伏层呈凹凸不平接触(图 8)。海侵体系域厚约 34m,为深灰—黑灰色白云岩,原岩为泥晶灰岩、藻粘结灰岩、藻纹层灰岩夹泥亮晶砂屑灰岩(见平行层理、槽状交错层理)、叠层石灰岩,主要形成于局限台地潮下带。高位体系域厚约 120m,主要岩性为浅灰—灰色白云岩,原岩为泥亮晶砂屑灰岩、藻纹层灰岩、藻粘结灰岩,形成于局限台地潮间带—潮下带上部。

层序 CSQ6 在柯坪水泥厂剖面(剖面起点: N 40°33'17"、E 78°56'29")也相当于上寒武统丘里塔格组上部—下奥陶统蓬莱坝组下部,其海侵体系域厚 71.6m,主要为泥亮晶粉屑灰岩、泥亮晶砂屑灰岩、藻纹层灰岩与白云岩互层组成,发育砂纹层理、低角度交错层理、平行层理、冲刷充填构造,局部含燧石条带,属于半局限台地(周期性开放与局限环境交替)潮间带—潮下带上部沉积;中部厚 2.5m 黑灰色白云岩(推测原岩为富含有机质的泥晶灰岩),形成于潮下低能带,大致相当于凝缩段;高位体系域厚 42m,主要岩性为白云岩夹少量泥亮晶粉屑灰岩,白



图 4 中一下寒武统层序 CSQ3 顶部层序界面特征

Fig. 4 The top sequence boundary of sequence CSQ3 in Lower—Middle Cambrian

左:块状岩溶角砾岩(白云岩),阿瓦塔格组下部(层序 CSQ3 顶部);右:层序 CSQ3 顶部(箭头所指)位于阿瓦塔格组下部,为暴露面及岩相突变面,其为局限台地相风化壳白云质泥岩及岩溶角砾岩;其上为斜坡相泥晶灰岩夹钙质泥岩及崩塌角砾岩(见图 5)。阿克苏肖尔布拉克剖面

Left: massive karst breccia (dolostone), the top of sequence CSQ3 (lower part of Awatage Fm.); Right: the top surface (arrow) of sequence CSQ3 located in lower part of Awatage Fm. is exposure surface and lithofacies mutation boundary, below which is restricted platform weathering crust dolomitized mudstone and karst breccia, and upon which is slope facies micritic limestone intercalated calcareous mudstone and slump breccia (see Fig. 5). Xiaerbulake section, Aksu, Xinjiang



图 5 中寒武统层序 CSQ4 海侵体系域底部斜坡相沉积特征

Fig. 5 Slope sediments at the bottom of transgression stand tract (TST) in sequence CSQ4 in Middle Cambrian

左:斜坡相泥晶灰岩夹钙质泥岩;右:斜坡相崩塌角砾岩。阿克苏肖尔布拉克剖面阿瓦塔格组

Left: slope facies micritic limestone intercalated calcareous mudstone; Right: slope facies slump breccia.

Xiaerbulake section, Aksu, Xinjiang

云岩中发育平行层理、低角度交错层理及藻纹层构造(推测原岩为藻纹层灰岩),含较多燧石条带,主要形成于局限台地潮间带—潮下带上部;其顶部为潮上带沉积的藻纹层白云岩被暴露风化改造形成厚 10~15cm 褐黄色铁质结壳(图 9),是该层序顶部暴露氧化特征。

2 钻测井层序地层特征

据露头及已有钻井古生物分析资料(张师本等, 1991;贾承造等,2004)并参考岩性组合、自然伽玛(GR)等测井曲线特征,可建立露头层序与钻—测井层序之间的对比关系,寒武系的 6 个三级层序在塔

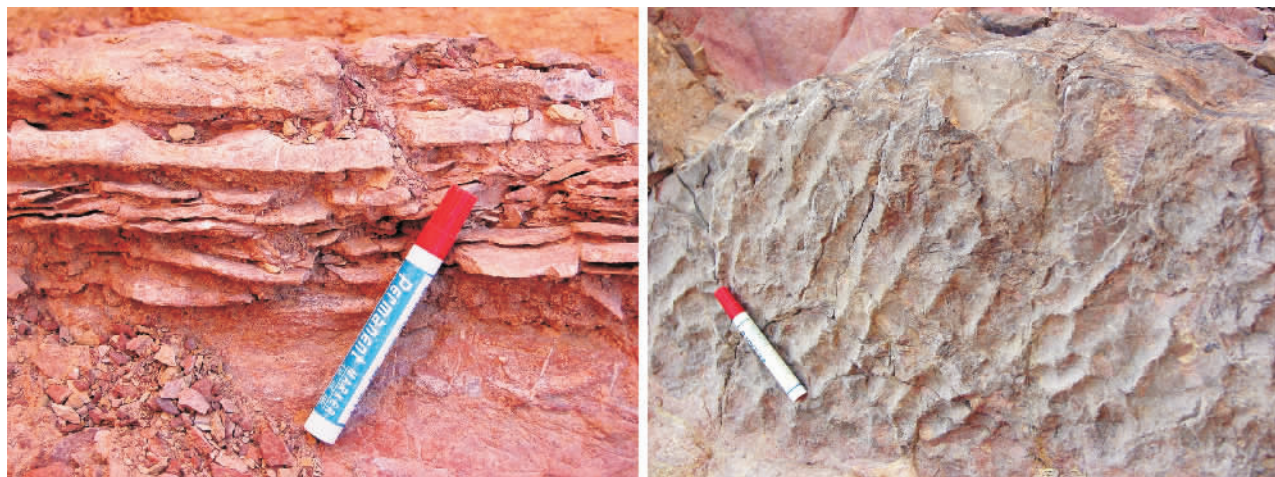


图 6 中寒武统层序 CSQ4 高位体系域沉积特征

Fig. 6 Sedimentary characteristics of high stand tract (HST) in sequence CSQ4 in Middle Cambrian

左:潮间带脉状层理钙质泥岩夹不规则状白云岩;右:潮间带白云岩,顶面见浪成干涉波痕。阿克苏肖尔布拉克剖面阿瓦塔格组
 Left: intertidal tidal bedding calcareous mudstone intercalated dolostone; Right: wave-formed ripple mark developed on the top surface of intertidal dolostone. Xiaerbulake section, Aksu, Xinjiang

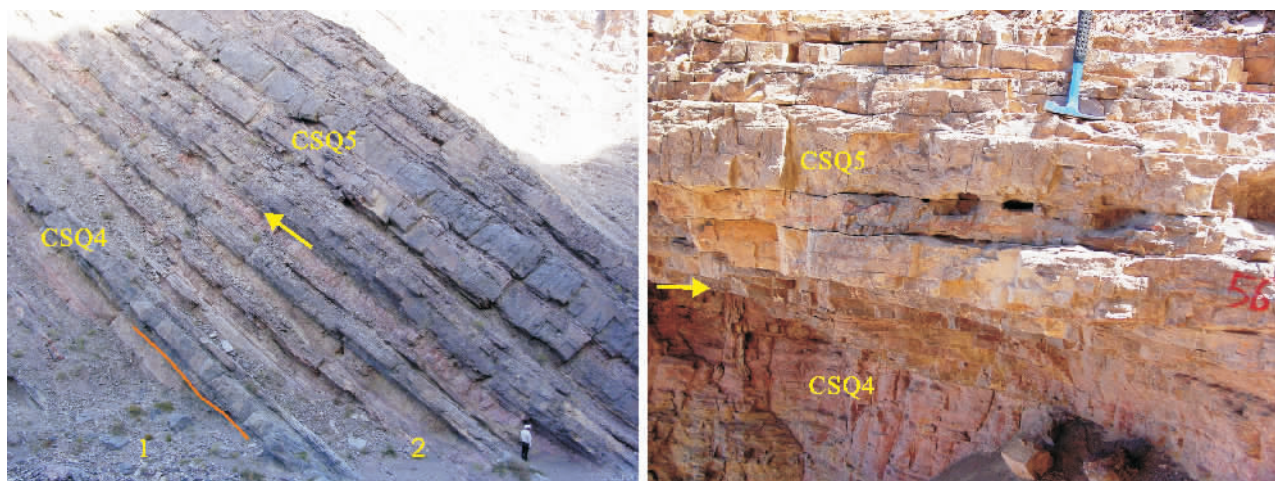


图 7 中寒武统层序 CSQ4 顶部层序界面特征

Fig. 7 The top sequence boundary of sequence CSQ4 in Middle Cambrian

左:层序 CSQ4 顶部(箭头所指)为岩相转换面,其下为 2 个潮间—潮上带向上变浅准层序,其上为潮下带白云岩;
 右:层序 CSQ4 顶部为潮上带白云质泥岩,层序 CSQ5 底部为潮下带白云岩。阿克苏肖尔布拉克剖面

Left: the top surface (arrow) of sequence CSQ4 is lithofacies conversion boundary, below which is 2 intertidal supratidal shallowing upward parasequences, and upon which is subtidal dolostone; Right: the top of sequence CSQ4 is supratidal dolomitized mudstone, the bottom of sequence CSQ5 is subtidal dolostone. Xiaerbulake section, Aksu, Xinjiang

里木盆地全区均有分布(图 10)。因受岩性岩相差影响,在盆地内大致可以划分出台地相、斜坡—盆地边缘相及盆地相 3 类层序特征。如图 10 示,方 1 井、和 4 井及塔参 1 井所发育的岩性岩相组合与盆地西缘阿克苏地区出露的寒武系露头剖面类似,属于台地相区层序类型,它们在钻测井曲线上表现为自然伽玛(GR)从层序 CSQ1 向层序 CSQ6 总体降低的趋势特征,说明台地相区从早寒武世向晚寒武

世逐渐向清水碳酸盐台地演化、亦即陆源物质的供给与沉积越来越少;这类层序主要分布于塔里木盆地中西部。

斜坡—盆地边缘相区层序类型以英东 2 井及米兰 1 井为代表,表现为自然伽玛以层序 CSQ5 最低而其上、下层序较高的趋势特征,说明晚寒武世晚期即层序 CSQ6 发育时期,塔东地区的陆源物质供给增加;该类层序主要分布于塔东斜坡相区。



图 8 上寒武统层序 CSQ5 顶部层序界面特征

Fig. 8 The top sequence boundary of sequence CSQ5 in Upper Cambrian

层序 CSQ5 顶面(箭头所指)位于丘里塔格组中部,为岩相转换面,其下为潮间—潮下带上部浅灰色白云岩,其上为潮下低能带深灰色白云岩。阿克苏肖尔布拉克剖面丘里塔格组

The top surface (arrow) of sequence CSQ5 located in middle part of Qiulitage Fm. is lithofacies conversion boundary, below which is intertidal upper subtidal grey dolostone, and upon which is subtidal low-energy dark grey dolostone. Qiulitage Fm. Xiaerbulake section, Aksu, Xinjiang

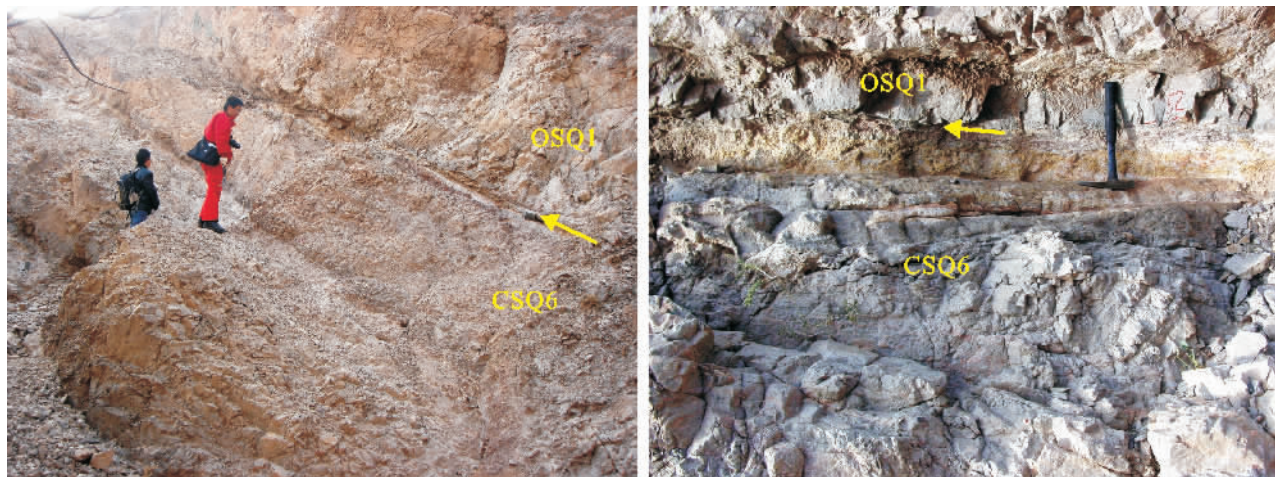


图 9 上寒武统一下奥陶统层序 CSQ6 顶部层序界面特征

Fig. 9 The top sequence boundary of sequence CSQ6 in Upper Cambrian to Lower Ordovician

层序 CSQ6 顶部为潮上带藻纹层白云岩被改造成黄色风化壳,层序 CSQ6 顶面(箭头所指)为暴露面,界面上、下主要为局限台地潮间带白云岩。柯坪水泥厂剖面蓬莱坝组下部

The top of sequence CSQ6 is supratidal algal mat dolostone altered into yellow weathering crust, and the top surface (arrow) of sequence CSQ6 is exposure boundary, below and upon which are chiefly restricted platform intertidal dolostone. The lower part of Penglaiba Fm. Shuinichang section, Keping county, Xinjiang

盆地相区层序类型以塔东 1 井、塔东 2 井为代表,其自然伽玛曲线特征介于台地相及斜坡—盆地边缘相之间,呈从层序 CSQ1 向层序 CSQ5 总体降低趋势但在层序 CSQ6 又呈现一定幅度的增高特征,说明陆源物质的供给自早寒武世至晚寒武世早期呈现总体降低趋势,但在晚寒武世晚期来自塔东

地区的陆源物质供给首先影响了塔东斜坡—盆地边缘相区,同时也影响到了塔东盆地相区,而对盆地中西部的清水碳酸盐台地相区影响不大;该类层序主要分布于塔东满加尔凹陷区。

另外,中寒武统层序 CSQ4 中—上部在全盆地 3 类层序类型中均表现出一定程度的自然伽玛增高

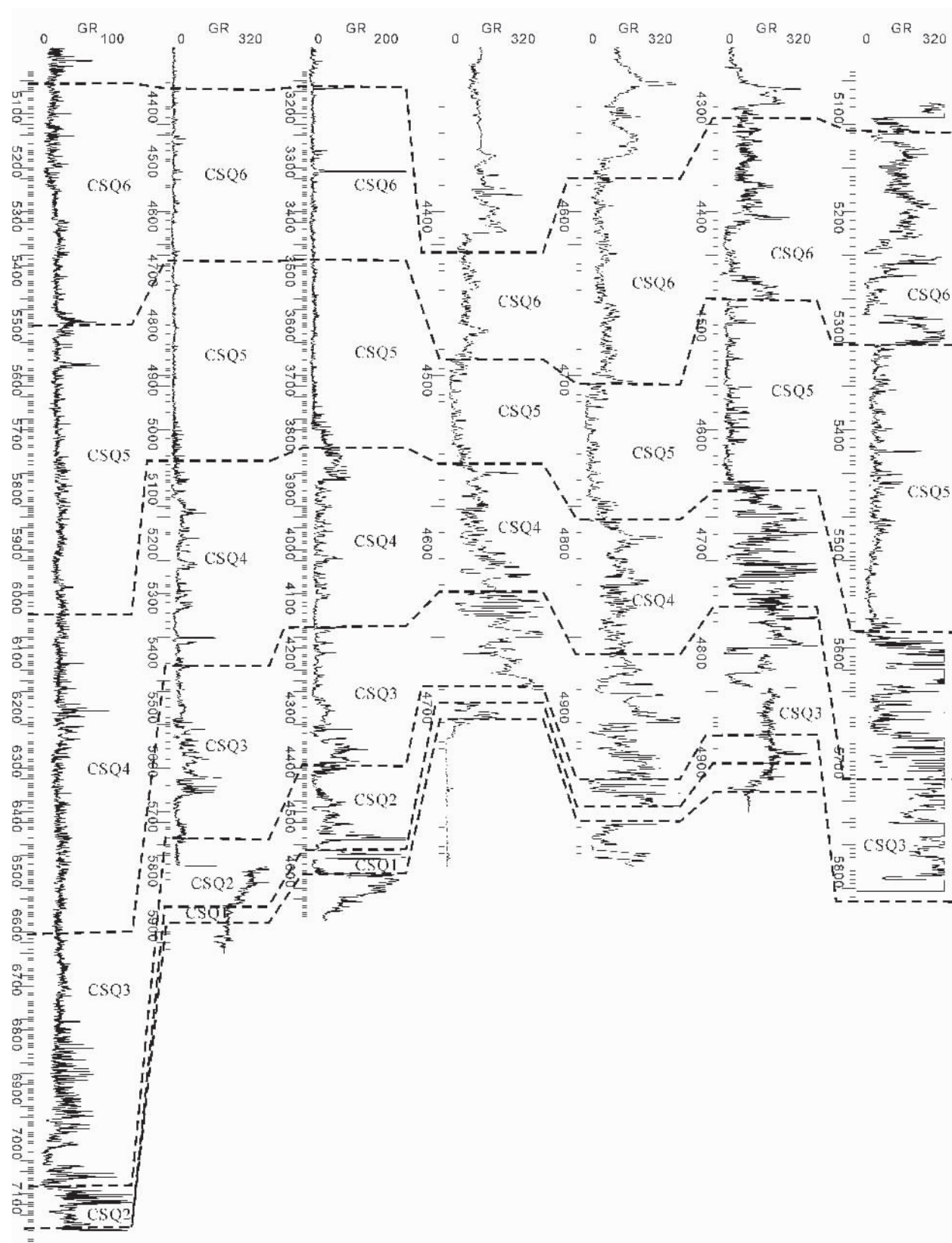


图 10 塔里木盆地寒武系测井层序特征及对比

Fig. 10 Drilling log sequences characteristics and correlation of Cambrian in the Tarim basin

GR—自然伽玛测井

GR—natural Gamma ray log

特征(图 10),在阿克苏露头区层序 CSQ4 中一上部主要为潮上带紫红色白云质泥岩沉积,该段地层陆源物质沉积的增高推测与中寒武世中一晚期的干旱古气候及其更强的风力作用带来更多的陆源粘土物质有关。

3 地震层序地层特征

迄今为止,塔里木盆地钻穿且揭示较完整寒武系的钻井不超过 10 口,主要位于塔中—巴楚隆起台地相区即塔参 1 井、和 4 井及方 1 井、以及塔东盆地相区的塔东 1 井、塔东 2 井,而轮南地区迄今尚无钻井钻穿寒武系,塔深 1 井钻遇了层序 CSQ3~层序 CSQ6(图 11),结合过塔参 1 井标定的近南北向地震大剖面的解释、可追踪到轮南地区,以此为据来综合解释轮南地区的地震剖面(图 11)。

从图 11 看到,轮南地区处于寒武系台地边缘相带部位,由西向东由局限台地内部→台地边缘→台缘斜坡的演变,这样的古地理位置对于识别三级层序及其层序界面特征是比较适合的。除层序 CSQ1 因厚度较小、其层序顶界面特征在地震剖面上显示不清楚以外,其它层序顶界面及其体系域特征在地

震剖面中均显示十分清楚(图 11),尤其是层序 CSQ3~层序 CSQ6 的顶界面在台地边缘相带部位表现出明显的削蚀截切特征以及层序 CSQ4、层序 CSQ5 底部还见到了呈上超叠置样式的低位体系域(LST),说明层序 CSQ3~层序 CSQ6 的顶界面均存在不同程度的暴露剥蚀作用改造,这十分有利于这些层序的台地边缘相带发生地表淡水岩溶作用并由此形成潜在的碳酸盐岩溶孔隙储层。

从层序 CSQ1~层序 CSQ6 的台地及其边缘沉积几何形态也在发生变化,总体上呈台地前缘斜坡由缓至陡、坡度由小到大的变化(图 11)。由下寒武统层序 CSQ1~CSQ2 进积型缓坡逐渐向中—上寒武统层序 CSQ4~CSQ6 镶边台缘模式的转变(图 11),恢复层序 CSQ1~CSQ2 台缘斜坡的坡度角大约为 1° 左右,应属于典型缓坡台地;自层序 CSQ3 至层序 CSQ6,台缘斜坡坡度角逐渐增大,恢复层序 CSQ5~CSQ6 斜坡坡度角为 $5^{\circ}\sim 9^{\circ}$,应属于坡度较小的镶边台地。图中显示层序 CSQ1 至层序 CSQ6 台缘高能相带向东推进了大约 26km,即由轮南 1 井处向东推进至解放 127 井以东位置,属于典型的进积型碳酸盐台地。

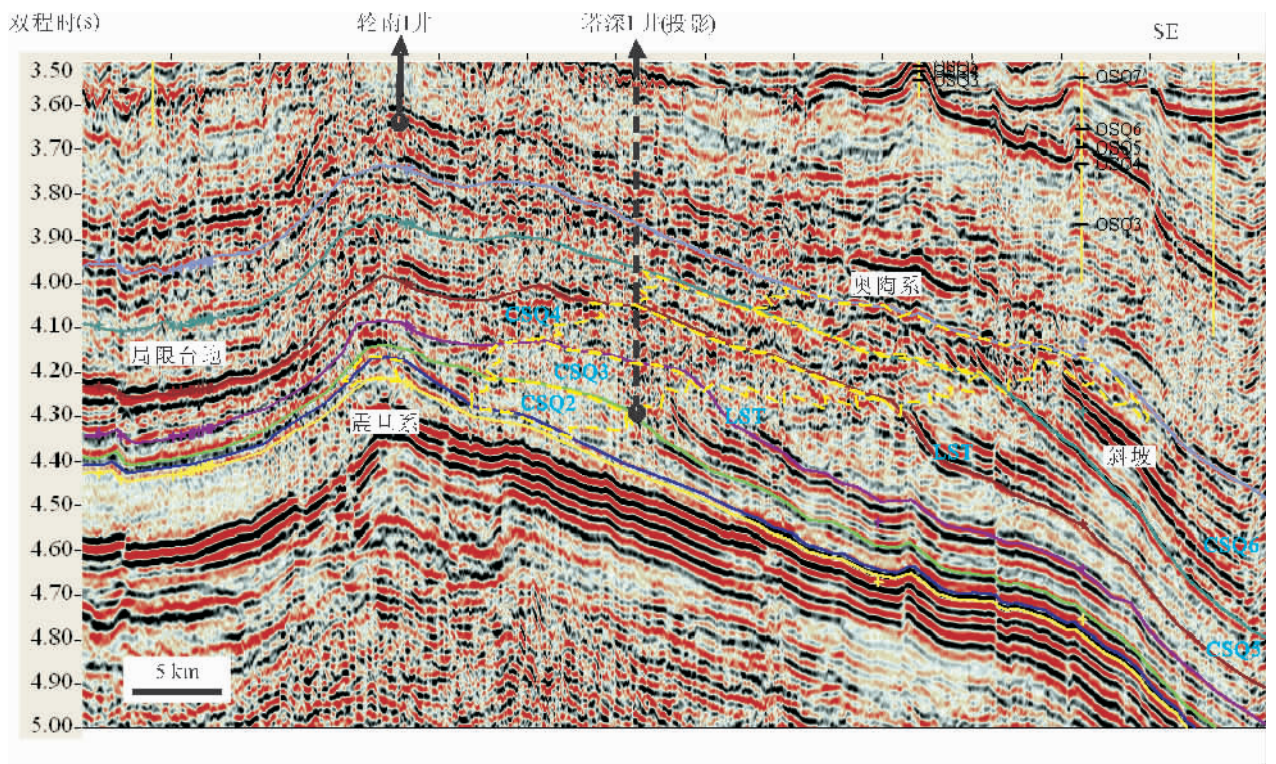


图 11 轮南地区三维地震切片寒武系地震层序解释

Fig. 11 Seismic sequences interpretation of Cambrian in Lunan area, northern Tarim basin

LST—低位体系域

LST—low stand system tract

4 层序地层格架及主控因素

综合露头、钻测井及地震层序解释资料,可建立塔里木盆地寒武系三级层序地层格架(表1),所划分的6个三级层序在全盆地范围内可追踪与对比。

表1 塔里木盆地寒武系层序地层格架

Table 1 The framework of Cambrian sequence stratigraphy in the Tarim basin

系	统	三级层序	中西部台地相	东部斜坡—盆地相
奥陶系	下统	OSQ1	蓬莱坝组	突尔沙克塔格组
		CSQ6		
	上统	CSQ5	丘里塔格组	
寒武系	中统	CSQ4	阿瓦塔格组	莫合尔山组
		CSQ3	吾松格尔组	
	下统	CSQ2	肖尔布拉克组	西大山组
		CSQ1	玉尔吐斯组	西山布拉克组
震旦系	上统		奇格布拉克组	汉格尔乔克组

诸多学者认为(Sarg, 1988; Tucker et al., 1990; Vail et al., 1991; Macdonald, 1991; Miall, 2000),某地区的相对水深变化是全球海平面变化、地区性构造变动(基底沉降与抬升)及沉积充填速率复合作用的结果,而相对水深变化控制了具体地区沉积及其层序发育特征。我们知道,某地区的碳酸盐岩沉积充填速率主要取决于海盆内本身的碳酸盐产率。据研究(Wilson, 1975; Schlager, 2005),海相碳酸盐产率主要来自生物成因碳酸盐产率并受光照度及沉积水深控制,主要分布于0~20m的光照饱和带并随着深度的增加呈指数性降低,大约到100m左右其产率减少到不足光饱和带的10%。另外,海相碳酸盐产率还与所处的纬度带有关,随着纬度的增加,其产率逐渐减小,特别是在30°以上的高纬度区,其碳酸盐产率较小(Schlager, 2005)。一般情况下,在三级层序时限内,某板块内的一定地区不会发生大的纬度、气候带的变化,其碳酸盐产率也不会发生大的变化,因此我们可以假设其沉积充填速率是一个相对恒定的常数。也就是说,沉积充填速率在多数情况下可以作为常量考虑,即沉积层序的影响因素就主要是全球海平面变化及基底沉降2个变量。

全球海平面相对变化可以海相碳酸盐岩全岩或化石壳(如腕足类等低镁方解石生物壳等)的碳同位素的变化来表征。研究认为(Hayes et al., 1999; Hoefs, 2004; Sharp, 2007),全球长期(ka~10Ma级

别)碳循环库主要是沉积碳酸盐岩及沉积有机质2大碳库,分别占地壳浅部及地球表层碳含量的79.952%及19.994%,而海水溶解碳、生物碳及大气层中所含的碳之和仅占地壳浅部及地球表层碳含量的0.054%。沉积碳酸盐岩的碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 平均0~1‰,沉积有机质的($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 平均则为-23‰~-25‰(Hoefs, 2004; Sharp, 2007),也就是说,碳酸盐岩富集 ^{13}C 而沉积有机质则富集 ^{12}C 。由于沉积有机质的埋藏保存于沉积物中,会带走更多的 ^{12}C ,造成地壳表层水圈、大气圈及生物圈中相对富集 ^{13}C ,使得从海水中沉积出来的碳酸盐岩以及有机质中均会富集 ^{13}C 、即造成 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值($\delta^{13}\text{C}$)的增高或碳同位素的正偏(Kump et al., 1999; Hoefs, 2004)。而沉积有机质的保存率与全球海平面升降有关(Tissot, 1979),一般地,全球海平面上升或处于高位则有利于沉积有机质的保存,反之则不利于保存。亦即碳同位素变重反映全球海平面相对升高,反之则反映相对下降。

从图1看到,除层序CSQ4的个别全岩氧同位素($\delta^{18}\text{O}\text{‰}$)存在异常、表现为很低及偏负的数值(说明这些个别全岩可能遭受了后期埋藏阶段成岩作用尤其是温度增高所造成的氧同位素分馏作用的改造),绝大多数全岩氧同位素值还是稳定可靠、反映总体上所受到的后期成岩作用改造较小、应主要代表了原始沉积时期的同位素信息;而碳同位素较氧同位素更为稳定,受后期成岩作用如温度增高等的的影响很小,可以认为绝大多数全岩碳同位素值反映了原始沉积时期的海水碳同位素信息。从沉积相分析中所得到的相对沉积古水深变化趋势,与全岩碳同位素分析所反映的全球海平面相对变化趋势并不完全一致(图1)。其中层序CSQ2、CSQ4、CSQ5、CSQ6的碳同位素变化趋势与沉积古水深变化趋势基本吻合,说明这些三级层序的发育主要受控于全球海平面变化,应属于全球海平面层序;而层序CSQ1、CSQ3的碳同位素变化趋势则与沉积古水深变化趋势完全相反,说明这2个三级层序的发育主要受控于地区性构造(拉张)运动,属于构造层序。也就是说,在层序CSQ1、CSQ3发育时期,塔里木盆地受到较为强烈的拉张作用影响并导致基底沉降速率增高,由此所产生的可容空间增加速率超过了全球海平面相对下降速率,并对这2个三级层序的形成起到了主要控制作用;而层序CSQ2、CSQ4、CSQ5、CSQ6发育时期,构造环境相对稳定,其基底沉降速率比较稳定且较小,可容空间或沉积古水深

变化主要取决于全球海平面变化,并由此控制形成了这 4 个三级层序。

对塔里木盆地西缘阿克苏地区下寒武统玉尔吐斯组的页岩及硅质岩的地球化学研究表明(于炳松等,2002,2004;陈践发等,2004;孙省利等,2004),其形成于拉张构造背景与海底热水活动有关并发育上升洋流的(大陆边缘)斜坡环境中。在塔里木盆地东北缘库鲁克塔格地区出露的下寒武统西山布拉克组中发育了基性火山岩(玄武岩、辉绿岩及凝灰岩)(贾承造等,2004),研究认为(贾承造,1997;李向民等,2006),其属于大陆裂谷型玄武岩,说明早寒武世早期相当于层序 CSQ1 发育时期,塔里木板块北缘存在强烈的拉张裂解运动,也正是这期拉张裂解运动控制了层序 CSQ1 的形成和演化,因此层序 CSQ1 属于典型的构造层序。从图 1 看到,寒武系 6 个三级层序中,仅层序 CSQ3 的顶部发育了厚达 32m 的岩溶角砾岩及厚达 3m 的古风化壳残积层(图 4),说明层序 CSQ3 发育末期存在长期的暴露溶蚀作用并形成其层序顶面,而其它层序顶面虽然也存在一定的暴露特征,但所形成的古风化壳特征多数不明显(图 3、图 7、图 8),其风化壳厚度远远小于层序 CSQ3 顶部古风化壳(图 9),结合全岩碳同位素旋回与沉积旋回对比分析认为,控制形成层序 CSQ3 及其顶部巨厚古风化壳的主要因素是构造运动,而层序 CSQ2、CSQ4~CSQ6 及其顶部层序界面的形成则主要受控于构造稳定沉降背景下的全球海平面变化,因此,层序 CSQ3 应属于构造层序,而层序 CSQ2、CSQ4~CSQ6 则主要属于全球海平面层序。

图 11 所反映的轮南地区寒武纪台地边缘总体呈现由早寒武世的缓坡向中一晚寒武世的镶边台地的演变以及由西向东的进积叠置型式,推测主要与全岩碳同位素总体微弱下降(图 1)所反映的寒武纪全球海平面总体微弱下降、以及寒武纪期间塔里木盆地基底沉降速率总体稳定且较小有关;由于全球海平面微弱下降及基底沉降速率较小,导致了可容空间的增加速率较小。也就是说,寒武纪期间,轮南台地的可容空间增加速率小于其碳酸盐产率,使得台地发生不断的向东进积并将过剩的碳酸盐产物搬运到台地边缘之外的斜坡带堆积下来,在层序 CSQ2~层序 CSQ6 的斜坡上沉积了较台地内部更厚的地层,甚至在层序 CSQ4~层序 CSQ6 中表现出斜坡相沉积厚度超过台地边缘相带沉积厚度的现象。

参 考 文 献 / References

- 陈国俊,史基安,薛莲花,王琪,肖立新. 1999. 塔里木西部古生代层序地层特征. 沉积学报,17(4):560~565.
- 陈践发,孙省利,刘文汇,郑建京. 2004. 塔里木盆地地下寒武统底部富有机质层段地球化学特征及成因探讨. 中国科学(D 辑),34(增刊 I):107~113.
- 樊太亮,刘金辉. 1997. 塔里木盆地北部震旦系—古生界层序地层特征. 石油与天然气地质,18(2):120~127.
- 贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京:石油工业出版社,1~425.
- 贾承造,张师本,吴绍祖. 2004. 塔里木盆地及周边地层(上、下册). 北京:科学出版社.
- 焦存礼,吕延仓,朱俊玲,樊太亮. 2003. 塔中地区古生界层序地层学与非构造圈闭研究. 中国石油勘探,8(4):17~23.
- 李向民,夏林圻,夏祖春,徐学义,马中平,王立社. 2006. 天山地区新元古代一早寒武世火山岩地球化学和岩石成因. 岩石矿物学杂志,25(5):412~422.
- 孙省利,陈践发,郑建京,刘文汇. 2004. 塔里木下寒武统富有机质沉积层段地球化学特征及意义. 沉积学报,22(3):547~552.
- 孙省利,陈践发,刘文汇,王大锐. 2004. 塔里木盆地地下寒武统硅质岩地球化学特征及其形成环境. 石油勘探与开发,31(3):45~48.
- 王毅. 1999. 塔里木盆地震旦系一中泥盆统层序地层分析. 沉积学报,17(3):414~421.
- 于炳松. 1996. 塔里木盆地北部古生代层序地层系统. 地质论评,42(1):14~21.
- 于炳松,陈建强,林畅松. 2001. 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. 中国科学(D 辑),31(1):17~26.
- 于炳松,陈建强,李兴武,林畅松. 2002. 塔里木盆地地下寒武统底部黑色页岩地球化学及其岩石圈演化意义. 中国科学(D 辑),32(5):374~382.
- 于炳松,陈建强,李兴武,林畅松. 2004. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面下寒武统底部硅质岩微量元素和稀土元素地球化学及其沉积背景. 沉积学报,22(1):59~66.
- 张宝民,张水昌,边立曾,王大锐. 2004. 塔里木盆地早寒武世灰泥丘孔洞中钙化红藻生殖器官化石的发现. 古生物学报,43(4):530~536.
- 张师本,高琴琴. 1991. 塔里木盆地震旦纪至二叠纪地层古生物(II),柯坪—巴楚地区分册. 北京:石油工业出版社.
- Hayes J M, Strauss H, Kaufman A J. 1999. The abundance of ^{13}C in marine organic matter and isotopic fractionation in the global biogeochemical cycle of carbon during the past 800Ma. Chem. Geol., 16(1):103~125.
- Hoefs J. 2004. Stable Isotope Geochemistry. Springer-Verlag, 1~240.
- Kump L R, Arthur M A. 1999. Interpreting carbon-isotope excursions: carbonates and organic matter. Chem. Geol., 16(1):181~198.
- Macdonald D I M. 1991. Sedimentation, Tectonics and Eustasy: Sea-Level Changes at Active Margins. Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ., 12, 1~518.
- Miall A D. 2000. Principles of Sedimentary Basin Analysis. Berlin: Springer, 1~616.
- Sarg J F. 1988. Carbonate sequence stratigraphy. In: Wilgus C K, et al. eds. Sea Level Changes—An Integrated Approach: SEPM Special Publication, No. 42, 155~181.

Schlager W. 2005. Carbonate Sedimentology and Sequence Stratigraphy. In: Concepts in Sedimentology and Paleontology. SEPM Special Publication, No. 8, 1~198.

Sharp Z. 2007. Principles of Stable Isotope Geochemistry. Houston, U. S. A. :Pearson Education, 1~380.

Tissot B. 1979. Effects on prolific petroleum source rocks and major coal deposits caused by sea-level changes. *Nature*, 277(5696): 463~465.

Tucker M E, Wright V P, Dickson J A D. 1990. Carbonate Sedimentology. Oxford: Blackwell Sci. Publ. ,1~482.

Vail P R, Audemard F, Bowman S A, Eisner P N, Perez-Cruz G. 1991. The stratigraphic signatures of tectonics, eustacy and sedimentology; an overview. In: Einsele G, et al. eds. Cycles and Events in Stratigraphy. Berlin: Springer-Verlag, 617~659.

Wilson J L. 1975. Carbonate Facies in Geologic History. New York: Springer, 1~471.

Cambrian Sequence Stratigraphic Framework in Tarim Basin

ZHAO Zongju^{1,2)}, ZHANG Yunbo³⁾, PAN Mao¹⁾, WU Xingning⁴⁾, PAN Wenqing^{1,5)}

1) School of Geoscience and Space Science of Peking University, Beijing, 100871;

2) State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery (Research Institute of Petroleum Exploration and Development), Beijing, 100083;

3) Energy Institute of China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083;

4) Hangzhou Institute of Petroleum Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang, 310023;

5) PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000

Abstract: Synthesizing the sequences characteristics of outcrop, drilling log and seismic data, the 3rd order sequence stratigraphic framework of Cambrian in Tarim basin has been established, and the Cambrian can be divided into six 3rd order sequences tracing and correlating in whole Tarim basin. Contrasting and analyzing between carbon isotope cycles of whole rock reflecting global sea level change or eustatic change and sedimentary cycles reflecting depositional water depth, the 3rd order sequences of Cambrian in Tarim basin may be divided into 2 types as eustatic sequence (sequence CSQ2, CSQ4, CSQ5, CSQ6), of which formation chiefly controlled by eustatic change, and tectonic sequence (sequence CSQ1, CSQ3), of which formation chiefly controlled by regional tectonic subsidence. The Cambrian platform margin in Lunnan area, northern Tarim basin, was generally behaved as evolution from ramp in Early Cambrian to rimmed platform in Middle—Late Cambrian, and progradational stacking style from west to east, it's speculated mainly related to faint eustatic fall in Cambrian and general stable and little tectonic subsidence in Tarim basin.

Key words: the 3rd order sequence; carbon isotope; eustatic sequence; tectonic sequence; carbonate; Cambrian; Tarim basin

况军博士荣获第八届光华工程科技奖青年奖

原中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院教授级高级工程师,现中国石油新疆油田分公司副总经理况军博士,经中国地质学会推荐,荣获第八届光华工程科技奖青年奖。

况军博士在石油地质研究领域积极探索创新,取得了巨大的成果,1992年以来以第一作者在多种学术期刊上发表有关准噶尔盆地石油地质的文章20多篇。他提出的盆地腹部油气勘探“三个有利领域”构想、准噶尔盆地“油气三种运移形式及定量计算模式”,准噶尔盆地形成、演化规律和准噶尔盆地油气系统理论等,为新疆油田的勘探开发发挥了重要作用。他主持并承担了多项国家和地方研究项目并获得多项奖励。其中主持完成的三级国家项目“准噶尔盆地天然气勘探方向及目标评价”,将准噶尔盆地天然气勘探主攻目标确立在盆地南缘和腹部,为近年来的突破奠定了理论基础。在

准噶尔盆地及外围盆地油气资源评价和准噶尔盆地天然气勘探开发研究中成果显著,指明了油气勘探的有利地区和勘探方向,在准噶尔盆地腹部、南缘油气勘探研究成绩卓越。

光华工程科技奖由中国工程院管理、承办,其宗旨是对在工程科学技术及管理领域取得突出成绩和重要贡献的中国工程师、科学家给予奖励,激励其从事工程科技研究、发展、应用的积极性和创造性,促进其工作顺利开展,并取得成果。该奖于1996年首次颁奖,每两年颁成就奖(1名),工程奖和青年奖各18名以下,且中国工程院每个学部不超过2名。此前,中国地质学会推荐的陈毓川院士获工程奖(2004年),孙龙德教授级高工获青年奖(2006年)。

(禹启仁、章雨旭报道)